

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

## Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**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.



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

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

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ivone Goulart Lopes – Instituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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 Alfnas

### **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 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

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 Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

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

Prof. Dr. 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Linguística, Letras e Artes**

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa  
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein  
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza  
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social  
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA  
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia  
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis  
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Liliansi Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas  
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo  
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba  
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

## Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
**Bibliotecária:** Janaina Ramos  
**Diagramação:** Maria Alice Pinheiro  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista  
**Revisão:** Os Autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

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

E57 Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-5706-773-4  
DOI 10.22533/at.ed.734212202

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

CDD 621.3

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.

## **APRESENTAÇÃO**

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **METODOLOGIA PARA TESTE E CLASSIFICAÇÃO DE SMART METERS PARA APLICAÇÕES EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Luiz Henrique Leite Rosa  
Renan Corrêa de Moura  
Marcio Ribeiro Cruz  
Carlos Frederico Meschini Almeida  
Nelson Kagan  
Alexandre Dominice

**DOI 10.22533/at.ed.7342122021**

### **CAPÍTULO 2..... 13**

#### **ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES**

Pedro Henrique Camargos  
Ricardo Elias Caetano  
Marcel Fernando da Costa Parentoni

**DOI 10.22533/at.ed.7342122022**

### **CAPÍTULO 3..... 25**

#### **COMO ATENUAR EMI EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS**

Rogério Martins de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.7342122023**

### **CAPÍTULO 4..... 39**

#### **MODELO MATEMÁTICO DE UMA TURBINA A GÁS DE 106 MW DE TIPO INDUSTRIAL COM UM ÚNICO EIXO**

Manuel Arturo Rendón Maldonado  
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

**DOI 10.22533/at.ed.7342122024**

### **CAPÍTULO 5..... 54**

#### **PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS - UMA ABORDAGEM USANDO SAMPLED VALUES**

Matheus Felipe Ayello Leite  
Arthur Augusto Pereira Cruz  
Angelo Cesar Colombini  
Márcio Zamboti Fortes  
Yona Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.7342122025**

### **CAPÍTULO 6..... 71**

#### **O USO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DIANTE DAS RECLAMAÇÕES POR DANOS ELÉTRICOS NO BRASIL**

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento  
Lilian de Fátima Costa Santos

Roberto Akira Yamachita  
Jamil Haddad  
Rodolfo Esmarady Rocha dos Santos  
Neiva Beatriz Ferreira Silva Vicentin  
Carlos Alberto Froés Lima

**DOI 10.22533/at.ed.7342122026**

**CAPÍTULO 7..... 83**

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DO HOSPITAL DE CLÍNICAS DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Álvaro Ribeiro Gomes de Oliveira  
Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior  
Nivaldo Leite da Silva Júnior

**DOI 10.22533/at.ed.7342122027**

**CAPÍTULO 8..... 97**

**ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS: OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE  
PROGRAMÁVEL**

Cássio Alves de Oliveira  
Josemar Alves dos Santos Junior  
Marcos José de Moraes Filho  
Vinícius Marcos Pinheiro  
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira  
Luciano Coutinho Gomes

**DOI 10.22533/at.ed.7342122028**

**CAPÍTULO 9..... 112**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA PARA PREVISÃO DE POTÊNCIA  
MÁXIMA EM SUBESTAÇÕES UTILIZANDO REDES NEURAIS**

Thommas Kevin Sales Flores  
Pedro Henrique Meira de Andrade  
Isaac Emmanuel Azevedo de Medeiros  
Juan Moises Mauricio Villanueva

**DOI 10.22533/at.ed.7342122029**

**CAPÍTULO 10..... 126**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA  
DISCRETA FRACIONÁRIA DE FOURIER E REDE NEURAL ARTIFICIAL**

Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento  
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti  
Antônio Carlos Duarte Ricciotti  
Adailton Braga Júnior  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira  
Júlio César Ribeiro

**DOI 10.22533/at.ed.73421220210**

<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>138</b>
<b>DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA COBERTURA DE APLICAÇÃO DE DEFENSIVO AGRÍCOLA USANDO MARCADORES ULTRAVIOLETA</b>	
Edson d'Avila Antônio Carlos Loureiro Lino Inácio Maria Dal Fabbro Ana Cristina da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220211</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>149</b>
<b>MODELAGEM E CONTROLE DE UM HELICÓPTERO DE BANCADA COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE</b>	
Matheus Sachet Rômulo Lira Milhomem	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220212</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>169</b>
<b>ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ESTUFAS HIDROPÔNICAS INTEGRADAS À IOT PARA FINS RESIDENCIAIS</b>	
Rogério Luis Spagnolo da Silva Renan Pinho Lucas Ramalho Paiva Jorge Augusto Igor Falla Henrique Alvarez	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220213</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>183</b>
<b>SEGMENTAÇÃO DE EXUDATOS DUROS USANDO LIMIAÇÃO ADAPTATIVA E CRESCIMENTO DE REGIÕES</b>	
Rafael de Freitas Brito Milena Bueno Pereira Carneiro Cristiane de Fátima dos Santos Cardoso	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220214</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>192</b>
<b>MICROGRID SYSTEM DESIGN BASED ON MODEL BASED SYSTEMS ENGINEERING: THE CASE STUDY IN THE AMAZON REGION</b>	
Miguel Angel Orellana Postigo José Reinaldo Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220215</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>208</b>
<b>ESTUDO COMPLEMENTAR DO USO DE UMA FONTE RESSONANTE PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM NÍVEIS DE MÉDIA TENSÃO</b>	
André Pinto Leão Maria Emília Lima Tostes João Paulo Abreu Vieira	

Ubiratan Holanda Bezerra  
Marcelo Costa Santos  
Ádrea Lima de Sousa  
Wesley Rodrigues Heringer  
Murillo Augusto Melo Cordeiro  
Juan Carlos Huaquisaca Paye  
Lucas de Paula Assunção Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.73421220216**

**CAPÍTULO 17.....224**

**FERRAMENTAS DE PROTOTIPAÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE POTÊNCIA:  
MATLAB VERSUS PYTHON**

Luciano de Oliveira Daniel  
Sergio Luis Varricchio

**DOI 10.22533/at.ed.73421220217**

**CAPÍTULO 18.....240**

**SENSIBILIDADES DE POLOS E ZEROS EM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE LINHAS  
DE TRANSMISSÃO REPRESENTADAS PELO MODELO DE BERGERON**

Sergio Luis Varricchio  
Cristiano de Oliveira Costa

**DOI 10.22533/at.ed.73421220218**

**CAPÍTULO 19.....256**

**UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS COM  
MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL**

Eloisa Bento Sarmento  
Mariana Gomes Costa  
Gileno Bezerra Guerra Junior  
Helder Alves Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.73421220219**

**CAPÍTULO 20.....264**

**PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS DE MICROFITA QUASE-  
FRACTAL UTILIZANDO A CURVA DE MINKOWSKI NÍVEL 2 COM APLICAÇÕES EM  
REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira  
Pedro Carlos de Assis Júnior  
Relber Antônio Galdino de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.73421220220**

**CAPÍTULO 21.....277**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DAS IMPRECIÇÕES NUMÉRICAS  
RESULTANTES DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS COM ARITMÉTICA INTEIRA**

Daniel Carrijo Polonio Araujo  
Gabriel de Souza Pereira Gomes  
Christos Aristóteles Harissis  
Rogério Andrade Flauzino

**DOI 10.22533/at.ed.73421220221**

<b>CAPÍTULO 22.....</b>	<b>298</b>
<b>TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA</b>	
Marcelo Nogueira Tirolli	
Alexandre Borges Marcelo	
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220222</b>	
<b>CAPÍTULO 23.....</b>	<b>312</b>
<b>A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS</b>	
Gabriel de Souza Pereira Gomes	
Daniel Carrijo Polonio Araujo	
Mateus Batista de Moraes	
Rafael Prux Fehlberg	
Murilo Marques Pinto	
Arthur Franklim Marques de Campos	
Marcos Eduardo Guerra Alves	
Rogério Andrade Flauzino	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220223</b>	
<b>CAPÍTULO 24.....</b>	<b>325</b>
<b>LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO</b>	
Mayara Helena Moreira Nogueira dos Santos	
Matheus Felipe Ayello	
Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro	
André da Costa Pinho	
Angelo Cesar Colombini	
Márcio Zamboti Fortes	
Yona Lopes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.73421220224</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>343</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>344</b>

## MODELAGEM E CONTROLE DE UM HELICÓPTERO DE BANCADA COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

*Data de aceite: 04/02/2021*

*Data de submissão: 06/11/2020*

### **Matheus Sachet**

Universidade Federal de Santa Catarina,  
Departamento de Automação e Sistemas  
Florianópolis – SC  
<http://lattes.cnpq.br/8157969063847980>

### **Rômulo Lira Milhomem**

Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de  
Santa Catarina, Departamento de Ensino,  
Pesquisa e Extensão  
Chapecó – SC  
<http://lattes.cnpq.br/5734418856768428>

**RESUMO:** Esse trabalho apresenta o desenvolvimento da modelagem matemática de um sistema não linear com três graus de liberdade, detalhando a metodologia utilizada para obter um modelo simples e dinâmico. Em seguida, é realizado o projeto e implementação de um controlador linear aplicado em um helicóptero de bancada didático desenvolvido na instituição. As equações dinâmicas do sistema foram obtidas segundo a formulação das equações de Newton-Euler. A arquitetura de controle segue um embasamento teórico implementada na forma de espaço de estados com ganho de realimentação obtido com base na aplicação de um Regulador Linear Quadrático, visando a regulação do sistema no ponto de equilíbrio. A convergência dos estados para o ponto de equilíbrio do sistema foi alcançada e a

partir de simulações computacionais, obteve-se a resposta dinâmica da planta em dois cenários de testes diferentes, analisando a resposta a uma condição inicial e a um degrau de referência. Posteriormente, a implementação prática do controlador no protótipo foi efetuada, permitindo assim realizar a comparação dos resultados reais com os simulados.

**PALAVRAS - CHAVE:** Modelagem matemática de sistemas dinâmicos, controle linear de sistemas dinâmicos, Regulador Quadrático Linear, teoria de controle.

**ABSTRACT:** This work presents the development of mathematical modeling of a nonlinear system with three degrees of freedom, detailing the methodology used to obtain a simple and dynamic model. After, the design and implementation of a linear controller applied in a didactic bench helicopter developed in the institution is carried. The dynamic equations of the system were obtained according to the formulation of Newton-Euler equations. The control architecture follows a theoretical base implemented in the form of state space with feedback gain obtained based on the application of a Quadratic Linear Regulator, aiming at the regulation of the system at the point of equilibrium. The convergence of states to the equilibrium point of the system was achieved and from computer simulations, the dynamic response of the plant was obtained in two different test scenarios, analyzing the response to an initial condition and a reference step. Subsequently, the practical implementation of the controller in the prototype was made, thus allowing to compare the actual results with the simulated ones.

**KEYWORDS:** Mathematical modeling of dynamic systems, linear control of dynamic systems, Linear Quadratic Regulator, theory of control.

## 1 | INTRODUÇÃO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's) vêm ganhando a comunidade civil nos últimos anos. Conhecido como drone, esse equipamento foi criado e desenvolvido a partir do uso militar, sendo usado em operações de segurança, obtenção de informações e até mesmo em ataques aéreos. Os drones obtiveram um avanço no desenvolvimento da sua tecnologia em várias áreas civis de atuação, como: captura de imagens, serviços de entrega, aplicação de pesticidas e lazer.

Acompanhando esses avanços, consolida-se o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente voltadas ao controle de voo relacionado a estabilidade, seguimento de trajetória ou até mesmo rejeição a perturbações. Assim, o ensino e aplicação de técnicas relacionadas a solução dos problemas clássicos de controle são de grande importância. Desta forma, o uso de experimentos é considerado uma eficiente atividade didática nos cursos de engenharia, uma vez que integra esforços intelectuais e técnicos de alunos e professores visando a aplicação de conceitos teóricos vistos em sala Rothe-Neves et al. (2004). Um exemplo, é a utilização de bancadas didáticas que representem o fenômeno a ser estudado.

Neste sentido, pode-se abordar a utilização de uma bancada didática para o estudo do comportamento dinâmico de drones. Atualmente, grupos de pesquisa e ensino de técnicas relacionadas a modelagem e controle, utilizam a bancada didática *3 DOF Helicopter*, Apkarian et al. (2012), servindo de modelo para o desenvolvimento de uma bancada semelhante no Laboratório de Instrumentação e Controle LABICON do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Chapecó, visto na Figura 2. Esta bancada, que possui três graus de liberdade contendo uma dinâmica incerta e não linear, fornece um modelo de um helicóptero de bancada de rotor em Tandem, simulando por exemplo, o helicóptero militar Boeing CH-47 Chinook visto na Figura 1.

Do ponto de vista da modelagem, alguns autores se dedicam ao desenvolvimento do modelo matemático do helicóptero, por exemplo, em Rajappa et al. (2013), um modelo matemático da bancada *3 DOF Helicopter* foi desenvolvido a partir de um método por Euler-Lagrange. A maioria dos modelos que foram desenvolvidos anteriormente na literatura fazem suposições no processo de modelagem desconsiderando algumas dinâmicas como fricção, a orientação do eixo em várias articulações, a relação motor/hélice, como em Khizer et al. (2014) e Chabir et al. (2016).



Figura 1 – Exemplo de sistema simulado pela bancada, helicóptero militar Boeing CH-47 Chinook.

Fonte: <https://www.boeing.com>.

Considerando o modelo matemático estudado, pode-se utilizar diferentes técnicas de controle a este tipo de sistema. Em Sini et al. (2017), aplicou-se uma estratégia de controle robusto utilizando um LQR, do inglês: *Linear Quadratic Regulator*, juntamente com um compensador para o rastreamento eficaz da trajetória; já em Yu et al. (2015), um método de controle robusto baseado na técnica de compensação de sinal e controle descentralizado é proposto visando a robustez contra não linearidades e incertezas do sistema; em Khizer et al. (2014), foi realizado a implementação da junção entre um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) paralelo com lógica *Fuzzy*.

Esse tipo de sistema também vem sendo estudado no IFSC Câmpus Chapecó, onde foi obtido um sistema semelhante ao *3 DOF Helicopter* estudado em Ragnini & Peccin (2016), onde o modelo matemático foi desenvolvido e aplicado à técnica de controle por realimentação linearizante em apenas um grau de liberdade. Após alguns testes, foi realizado uma readequação desse sistema, aplicando melhorias de projeto resultando no protótipo visto na Figura 2.

Assim, o presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver a modelagem matemática do sistema apresentado na Seção 2, permitindo o projeto e a implementação de controladores para um sistema não linear e instável. Para isso, são realizadas a modelagem dinâmica da planta via equações de Newton-Euler, simulação e a validação do modelo matemático obtido, buscando-se um modelo simples e didático para fácil entendimento e implementação dos próximos trabalhos a serem realizados neste sistema. Adicionalmente, busca-se adequar e validar o modelo matemático do sistema através de simulações, comparando o sistema real ao modelo matemático obtido. Com isso desenvolver um controlador que garanta a estabilidade do sistema, e resolva o problema de regulação via

realimentação de estados, empregando técnicas de controle moderno.

As próximas seções deste artigo são estruturadas da seguinte forma. Na Seção 2, os aspectos construtivos do sistema utilizado como estudo são apresentados, descrevendo seu funcionamento e suas principais características. A modelagem matemática do sistema é realizada na Seção 3, a análise e projeto do controlador na Seção 4. A Seção 5 apresenta a implementação do controlador e os resultados obtidos na Seção 6. Por fim, a última seção descreve as conclusões do trabalho.

## 2 | ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Para ilustração do protótipo e compreensão do seu funcionamento, índices numéricos são utilizados para identificação dos principais componentes presentes no sistema visto na Figura 2 conforme descrito na Tabela 1.

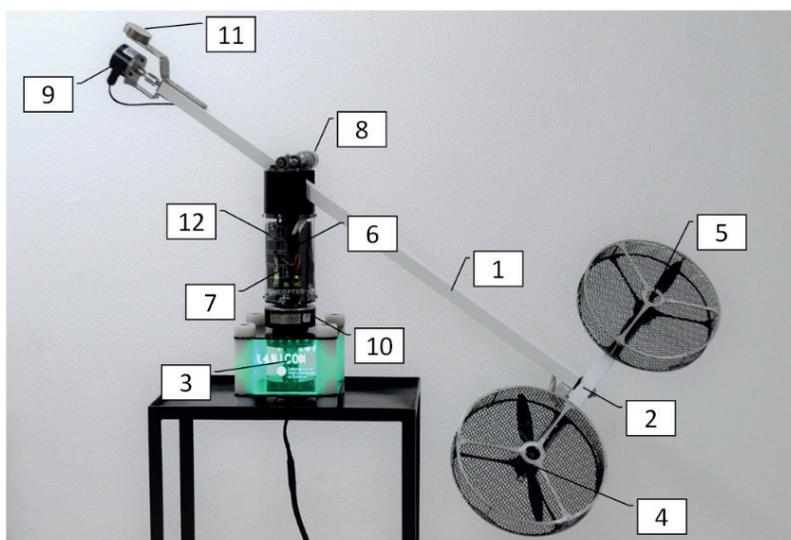


Figura 2 – Helicóptero de bancada utilizado para o estudo.

Fonte: Autoria própria.

O helicóptero de bancada visto na Figura 2 consiste em um corpo rígido fixado em uma junta rotacional. O sistema possui três principais eixos acoplados em ordem, o que resulta nos três graus de liberdade. No rotor central responsável pelo movimento de deslocamento, estão presentes os dispositivos de controle, transmissão de dados e acionamento do sistema. No topo do rotor central suspenso por um eixo bi apoiado, encontra-se o eixo de elevação, que por sua vez, sustenta o eixo de arfagem por um eixo interno ao tubo de sustentação. Por fim, os motores são fixados nas extremidades do eixo

de arfagem, responsáveis por gerar a movimentação do sistema.

Índice	Descrição	Especificação
1	Eixo de elevação	1,12m
2	Eixo de arfagem	0,45m
3	Eixo de deslocamento	0,40m
4	Motor dianteiro	EMAXs 2213
5	Motor traseiro	EMAXs 2213
6	Drivers de acionamento	Simon K 30A
7	Microcontrolador	ATMega 2560
8	Encoder elevação	360ppr
9	Encoder arfagem	1024ppr
10	Encoder deslocamento	1024ppr
11	Contrapeso	500g
12	Módulo Bluetooth	HC – 05

Tabela 1 – Dispositivos presentes no sistema.

### 3 I MODELAGEM MATEMÁTICA

Para análise das componentes atuantes na planta, o diagrama de corpo livre é ilustrado na Figura 3, especificando as variáveis e constantes presentes no sistema como visto na Tabela 2.

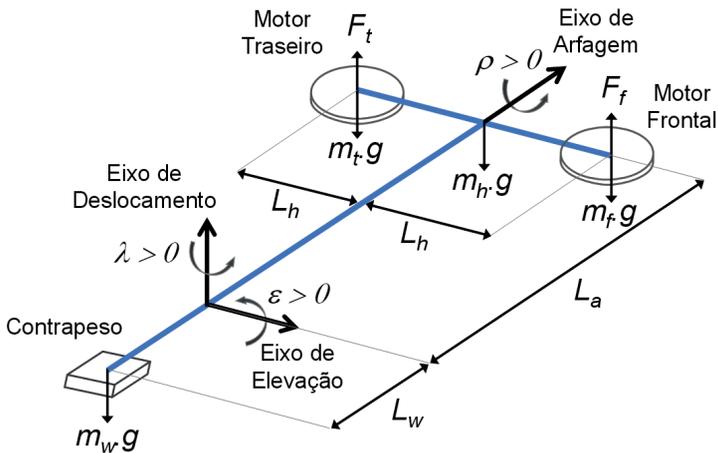


Figura 3 – Diagrama de corpo livre do sistema completo.

Fonte: Autoria própria.

O sistema apresenta três grau de liberdade e suas equações dinâmicas são determinadas a partir da aplicação da segunda lei de Newton na Figura 3, onde para melhor entendimento do sistema, os eixos são estudados separadamente. O resultado é um conjunto de equações que possibilitam estabelecer o comportamento dinâmico do sistema. A variável  $t$ , que indica a variação no tempo do sistema, será omitida para simplificação das equações.

Variável	Descrição
$\varepsilon$	Ângulo elevação
$\rho$	Ângulo arfagem
$\lambda$	Ângulo deslocamento
$J_\varepsilon$	Momento de inercia elevação
$J_\rho$	Momento de inercia arfagem
$J_\lambda$	Momento de inercia deslocamento
$L_w$	Distância do contrapeso
$L_a$	Distância dos motores
$L_h$	Distância da fixação do motor
$m_w$	Massa do contrapeso
$m_h$	Massa da haste dos motores
$m_f$	Massa do motor frontal
$m_t$	Massa do motor traseiro
$F_p$	Força do conjunto propulsor
$F_g$	Força gravitacional
$F_f$	Força motor/hélice frontal
$F_t$	Força motor/hélice traseiro
$T_g$	Torque gravitacional
$K_f$	Constante de força propulsão
$g$	Constante gravitacional

Tabela 2 – Variáveis e constantes do sistema.

### 3.1 Eixo de elevação

Considerando o diagrama de corpo livre mostrado na Figura 4, é possível analisar as forças que atuam sobre o corpo, e deduzir a equação de movimento do sistema, a partir da segunda lei de Newton aplicada a movimentos rotacionais  $I\ddot{\theta} = \sum T$  onde  $I$  é a inércia,  $\ddot{\theta}$  a aceleração angular e  $\sum T$  o somatório dos torques empregados.

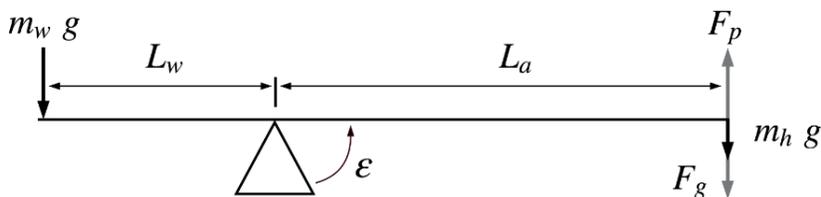


Figura 4 – Diagrama de corpo livre do eixo de elevação.

Fonte: Autoria própria.

A dinâmica rotacional da haste em relação ao ponto de apoio se dá por

$$J_{\varepsilon} \ddot{\varepsilon} = L_a (F_p - F_g), \quad (3.1)$$

onde  $J_{\varepsilon}$  é o momento de inércia da haste em relação ao ponto de apoio. Sendo  $F_p$  a força propulsora do sistema composta pelos dois vetores  $F_f$  e  $F_t$  resultantes da força gerada pelos motores. O resultado do produto de  $L_a$  e  $F_g$  gera o torque gravitacional  $T_g$ , assim, (3.1) pode ser reescrita como

$$F_p = F_f + F_t$$

$$J_{\varepsilon} \ddot{\varepsilon} = L_a (F_f + F_t) - T_g. \quad (3.2)$$

Através da análise dos mecanismos do sistema real, é possível notar uma dinâmica rígida e balanceada, minimizando a ação dos acoplamentos e o torque gravitacional, onde foi possível desconsiderar a componente  $T_g$ . A constante de força  $K_p$ , obtida através de testes, relaciona a força gerada pelo conjunto propulsor motor/hélice em relação a tensão aplicada, onde  $F_f = K_f V_f$  e  $F_t = K_t V_t$ , aplicando essa relação em (3.2) tem-se

$$J_{\varepsilon} \ddot{\varepsilon} = L_a K_f (V_f + V_t).$$

Realizando a análise vetorial das componentes atuantes no sistema, o momento de inércia  $J_{\varepsilon}$  é

$$J_{\varepsilon} = m_w L_w^2 + m_h L_a^2,$$

e a equação que relaciona a aceleração do ângulo de elevação à dinâmica do sistema

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{L_a K_f (V_f + V_t)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2}.$$

### 3.2 Eixo de arfagem

O eixo de arfagem é responsável por direcionar o restante do sistema, que também representada a aeronave vista na Figura 1. A partir do diagrama de corpo livre visto na Figura 2, é realizada a análise do sistema.

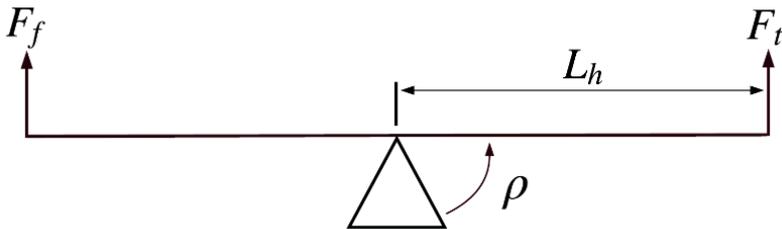


Figura 5 – Diagrama de corpo livre do eixo de arfagem.

Fonte: Autoria própria.

Para a dinâmica do eixo de arfagem tem-se

$$J_{\rho}\ddot{\rho} = L_h(F_f - F_t) , \quad (3.3)$$

sendo  $J_{\rho}$  o momento de inércia da haste de sustentação dos motores em relação ao acoplamento rotacional. Relacionando a constante de força  $K_f$  do conjunto propulsor motor/hélice ao vetor força atuante no sistema, podemos reescrever (3.3) como

$$J_{\rho}\ddot{\rho} = L_h K_f (V_f - V_t) ,$$

onde a diferença do sinal de tensão aplicada aos motores ocasionará a variação do ângulo de arfagem  $\rho$ , instabilizando o sistema.

Detalhando as componentes empregadas no momento de inércia  $J_{\rho}$  em

$$J_{\rho} = 2m_f L_h^2 ,$$

obtém-se a equação que relaciona a aceleração do ângulo de arfagem a dinâmica do sistema

$$\ddot{\rho} = \frac{L_h K_f (V_f - V_t)}{2m_f L_h^2} .$$

### 3.3 Eixo de deslocamento

Para verificar a dinâmica do eixo de deslocamento, a análise vetorial do diagrama de corpo livre da Figura 6 é executada.

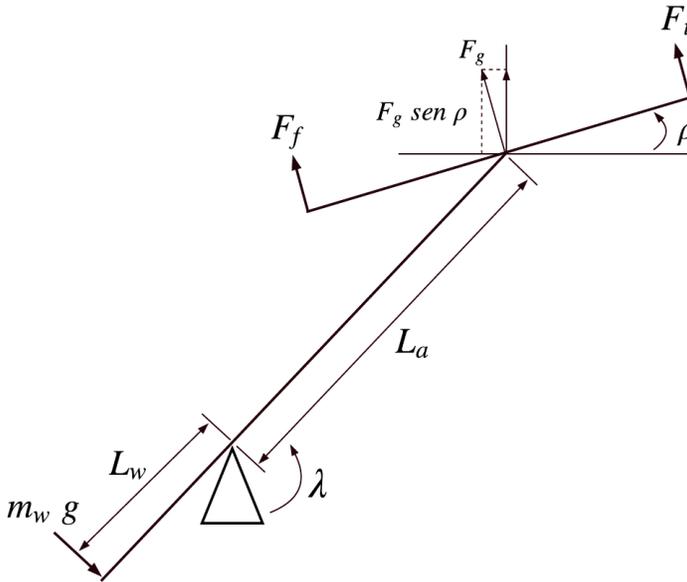


Figura 6 – Diagrama de corpo livre do eixo de deslocamento.

Fonte: Autoria própria.

A dinâmica que relaciona o movimento do eixo de deslocamento pode ser obtida por

$$J_\lambda \ddot{\lambda} = -F_g \text{sen}(\rho) ,$$

onde  $J_\lambda \ddot{\lambda}$  é o momento de inércia do conjunto acoplado ao rotor central onde  $Fg = (m_w L_w - m_h L_a)g$  o vetor força resultante na extremidade da haste. Detalhando as respectivas componentes do momento de inércia em

$$J_\lambda = m_w L_w^2 + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2 ,$$

obtém-se a equação que relaciona a aceleração do ângulo de deslocamento a dinâmica do sistema

$$\ddot{\lambda} = \frac{(m_w L_w - m_h L_a)g \text{sen}(\rho)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2} .$$

Assim, obtêm-se as equações diferenciais não lineares que caracterizam o comportamento das variáveis de posição angular ,  $\epsilon$ ,  $\rho$  e  $\lambda$ , sendo

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{L_a K_f (V_f + V_t)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2}, \quad (3.4)$$

$$\ddot{\rho} = \frac{L_h K_f (V_f - V_t)}{2m_f L_h^2}, \quad (3.5)$$

$$\ddot{\lambda} = \frac{(m_w L_w - m_h L_a) g \operatorname{sen}(\rho)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2}. \quad (3.6)$$

### 3.4 Linearização do sistema

No sistema em questão, a não linearidade é observada pela existência da componente  $\operatorname{sen}(\rho)$  em (3.6). Para se obter um modelo matemático linear, admiti-se que as variáveis desviem apenas ligeiramente de alguma condição de operação. Desta forma, o processo de linearização utiliza-se da série de Taylor em torno do ponto de operação, e a retenção somente do termo linear. Para o sistema em (3.6), tem-se

$$\operatorname{sen}(\rho) \simeq \rho, \quad (3.7)$$

substituindo (3.7) em (3.6), obtêm-se

$$\ddot{\lambda} = \frac{(m_w L_w - m_h L_a) g \rho}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2}. \quad (3.8)$$

Assim, pode-se realizar a análise do ponto de equilíbrio do sistema, estimando a energia necessária para que o sistema opere na região de regulação.

### 3.5 Representação em espaço de estados

Equações (3.4), (3.5) e (3.8) transcrevem a dinâmica do sistema da Figura 2, com as quais pode-se determinar uma representação em espaço de estados equivalente, dado

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx, \quad ,$$

onde  $x$  é o vetor de estados e  $u$  são as entrada de sinal do sistema. Sendo  $x = [\varepsilon \ \rho \ \lambda \ \dot{\varepsilon} \ \dot{\rho} \ \dot{\lambda}]'$  e  $u = [V_f \ V_t]'$  é válida a seguinte representação:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m_w L_w - m_h L_a) g \rho & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(m_w L_w + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2 + 2m_f L_h^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{L_a K_f (V_f + V_t)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2} & \frac{L_a K_f (V_f + V_t)}{m_w L_w^2 + m_h L_a^2} \\ \frac{L_h K_f (V_f - V_t)}{2m_f L_h^2} & -\frac{L_h K_f (V_f - V_t)}{2m_f L_h^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde as matrizes  $A$  e  $B$  representam os estados e o sinal de entrada do sistema respectivamente, e a matriz  $C$ , as saídas desejadas. Sendo a matriz de interconexão da entrada com a saída,  $D = 0$ . Ao término da análise do sistema não linear para derivação de um modelo linear, aplica-se uma metodologia de validação do equacionamento.

#### 4 | ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLE

O problema da regulação consiste em manter o erro pequeno quando a referência é no máximo um sinal de referência constante, podendo existir distúrbios conforme Franklin et al. (2013). Para resolução desse problema, a técnica de controle por realimentação de estados é implementada em simulação, posteriormente é utilizado um regulador ótimo para obter os valores de ganho do controlador. Na prática, a realimentação dos estados é obtida através dos dispositivos de instrumentação existentes no sistema real, correspondendo a posição angular, e dos três graus de liberdade.

Para estimação dos valores de velocidade, a derivada temporal de cada estado é associada, resultando na implementação de um filtro derivativo. O processo pode ser visualizado na Figura 7, utilizando um diagrama de blocos simplificado para demonstração.

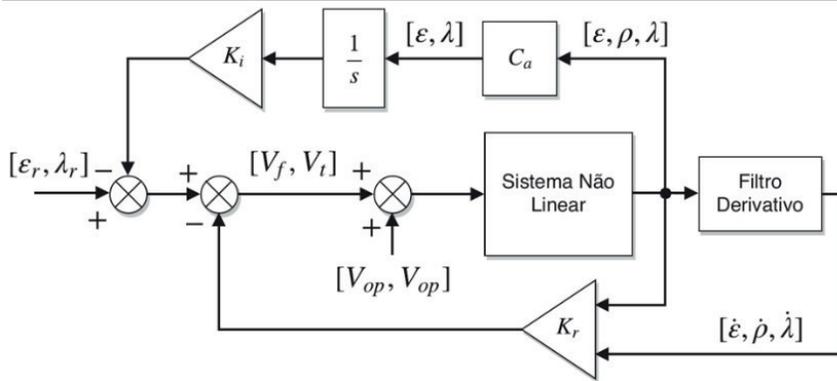


Figura 7 – Representação da malha de controle.

Fonte: Autoria própria.

Para os ângulos de elevação ( $\epsilon$ ) e deslocamento ( $\lambda$ ), se aplica a parcela integral da realimentação, convergindo o sistema para a referência em regime permanente. Assim, utilizando o princípio da separação de estados, é implementada a matriz  $C_\alpha$  de saída vista em (3.9). A matriz  $C_\alpha$  é necessária para a aplicação da parcela integral apenas nas posições angulares desejadas. O *offset* no sinal de tensão  $V_{op}$  é aplicado aos motores no sistema real, para que possa operar em seu ponto de equilíbrio.

$$C_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Desta forma, considera-se a lei de controle dada em (4.2)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ V_t \end{bmatrix} = -K_r x(t) + K_i \int_0^\infty e(t) dt \quad (4.2)$$

Nesse sentido, o objetivo da implementação do controlador é a regulação do sistema em seu ponto de equilíbrio, buscando como requisito de projeto de controle o ajuste dos ganhos  $K$  para a operação de mínima energia do sistema. Sendo assim, o ajuste pela implementação de um controle ótimo LQR contempla as características almejadas.

O LQR é amplamente utilizado em várias aplicações, tendo a vantagem de fornecer um modo sistemático de cálculo da matriz de ganho de controle por realimentação de estados como visto em Ogata et al. (2011). Além disso, o índice de desempenho representado pela matriz  $J$  é minimizado pela seleção adequada dos ganhos de realimentação. A função custo relacionada ao ajuste da performance do controlador é representado por

$$J = \int_0^\infty x' Q x + u' R u dt \quad (4.3)$$

onde as matrizes  $Q$  e  $R$  são definidas positivas e reais simétricas. Assim, o termo  $u'Ru$  da equação (4.3) determina o consumo de energia dos sinais de controle, e as matrizes  $Q$  e  $R$  determinam a importância relativa do erro e o consumo dessa energia.

Após a definição da lei de controle, e a parametrização de suas variáveis, obtêm-se o novo vetor de estados

$$x_i = [\varepsilon \rho \lambda \dot{\varepsilon} \dot{\rho} \dot{\lambda} \int \varepsilon dt \int \lambda dt]'$$

Através dos parâmetros numéricos obtidos do sistema real, vistos na Tabela 3, as matrizes  $A$  e  $B$  numéricas, representadas algebricamente em (3.9) e (3.10), podem ser geradas.

Constante	Magnitude	Unidade
$J_\varepsilon$	Momento de inercia elevação	$kgm^2$
$J_\rho$	Momento de inercia arfagem	$kgm^2$
$J_\lambda$	Momento de inercia deslocamento	$kgm^2$
$L_w$	Distância do contrapeso	$m$
$L_a$	Distância dos motores	$m$
$L_h$	Distância da fixação do motor	$m$
$m_w$	Massa do contrapeso	$g$
$m_h$	Massa da haste dos motores	$g$
$m_f$	Massa do motor frontal	$g$
$m_t$	Massa do motor traseiro	$g$
$K_f$	Constante de força propulsão	$N/V$
$g$	Constante gravitacional	$m/s^2$

Tabela 3 – Constantes do sistema físico.

Para implementação da parte integral na realimentação, faz-se necessário a expansão das matrizes  $A$  e  $B$ , utilizando-se da matriz  $C_a$  vista em (4.1), que foi adaptada para integração somente dos ângulos desejados. Assim, tem-se

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C_a & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nesse contexto, pode-se gerar a matriz de ganho  $K = [K_r - K_i]$ , através da implementação do LQR, aplicando as matrizes  $Q$  e  $R$  vistas em (4.3) para ponderação dos estados e minimização da energia de sinal de controle, onde

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

são os valores atribuídos. Assim, a matriz de ganho K encontrada foi

$$K = \begin{bmatrix} 15.83 & 27.65 & -17.97 & 7.53 & 4.90 & -11.15 & -10.00 & 10.00 \\ 15.83 & -27.65 & 17.97 & 7.53 & -4.90 & 11.15 & -10.00 & -10.00 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Neste sentido, ao estabelecer a lei de controle para a estabilidade do sistema e os ajustes da malha necessários para implementação das simulações, pode-se obter os valores de ganho para aplicação ao sistema real.

## 5 I IMPLEMENTAÇÃO

Para a implementação do algoritmo de controle no sistema real, a equação que rege a lei de controle é discretizado e o projeto de implementação em *hardware* é desenvolvido. O dispositivo utilizado para gerenciamento e controle dos dados é o microcontrolador Arduino ATmega 2560, que trabalha em uma frequência de 16 Mhz e possui arquitetura 16 bits resolução utilizada para o acionamento dos drivers dos motores. A discretização é desenvolvida através da análise das componentes da lei de controle, onde para estimar o valor do período de amostragem, foram analisados os autovalores do sistema de malha fechada, obtendo uma dinâmica 10 vezes mais rápida com o valor da constante de tempo  $T=24\text{ms}$ .

Sendo a parte integral composta pela equação discreta

$$I[n] = [Te[n] + I[n - 1]] ,$$

onde  $T$  é a constante de tempo de amostragem do sistema e  $e[n]$  o erro calculado em relação a referência setada. Assim, obtêm-se a equação da lei de controle discreta

$$u[n] = K_r x[n] + K_i [[Te[n] + I[n - 1]]]$$

onde os vetores de ganho  $K_r$  e  $K_i$  derivam do vetor obtido  $[k]$  representado em (4.4). A variável  $u[n]$  representa o vetor de entrada do sinal de tensão do sistema  $[V_f V_i]$  e  $x[n]$  a matriz de estados.

Para realizar a realimentação dos estados, sendo que apenas as posições angulares são instrumentadas através dos sensores físicos existentes na planta, um filtro derivativo é implementado. A topologia do filtro foi realizada a partir de SIEMENS (2019), e discretizado

via método de Tustin visto em Franklin et al. (2013), obtendo a forma

$$y[n] = \left[ \frac{2au[n] - 2au[n - 1] - (T - 2aT_d)y[n - 1]}{T + 2aT_d} \right]$$

sendo  $y[n]$  o dado de saída do filtro,  $T_d$  a constante de tempo derivativa e a parcela de ajuste da dinâmica do filtro.

Na prática, o microcontrolador realiza a leitura das variáveis de posição dos ângulos no tempo  $T$ , atualiza o cálculo do filtro derivador, escrevendo as componentes do vetor de estados. Em seguida, a matriz de erro é estruturada para realimentação da parte integral. O fluxograma visto na Figura 8, simplifica a lógica implementada.

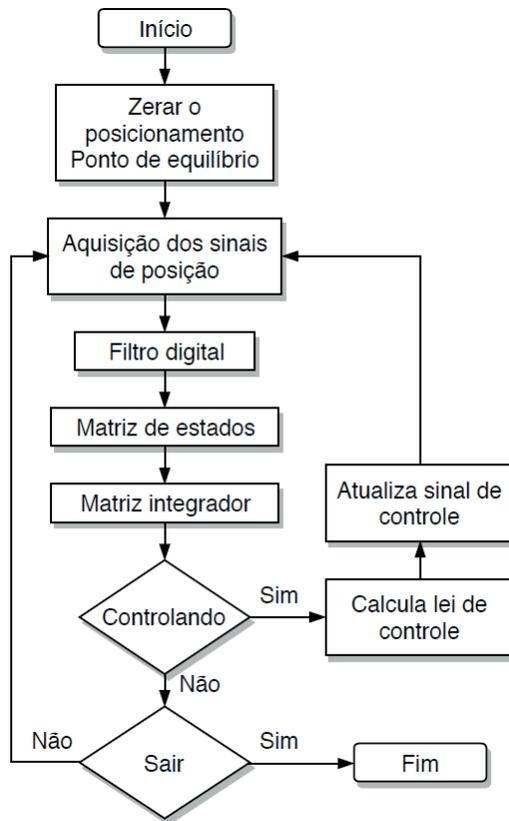


Figura 8 – Fluxograma do algoritmo implementado no protótipo.

Fonte: Autoria própria.

Ao finalizar a fase de implementação da realimentação do controlador no sistema real, a abordagem do cenário de validação e os testes padrões a serem aplicados são

discutidos.

## 6 I ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para a obtenção de dados para análise e comparação entre o sistema simulado e o real, é importante a padronização dos testes e o controle do ambiente a ser executado. Somente assim, os resultados gerados através da aplicação de uma metodologia, podem ser validados.

A bancada utilizada para aplicação dos estudos possui uma área de movimentação de 1,80m de diâmetro e 1,90m de altura. Portanto, para implementação dos testes, um ambiente com características particulares foi montado como cenário de testes. O espaço utilizado para os testes foi o laboratório de robótica do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFSC Câmpus Chapecó, que possui uma área de aproximadamente 36m<sup>2</sup> e um pé direito de 2,90m.

Ao iniciar o sistema, leva-se manualmente os eixos de elevação e arfagem para a posição horizontal e com o auxílio de um software supervisor instalado em um computador, o sistema é zerado e este se torna o ponto de referência. Assim, a implementação dos testes para a verificação da convergência do sistema para o ponto de referência, e a análise de estabilidade foram aplicados.

### 6.1 Resposta à condição inicial

A convergência dos estados do sistema para o ponto de equilíbrio, pode ser averiguada pela aplicação de energia potencial ao sistema. No caso do modelo teórico simulado, a aplicação dessa energia é especificada pelas condições iniciais consideradas no problema.

Os valores das condições iniciais foram em torno do ponto de operação  $[\varepsilon \rho \lambda] = [0^\circ 0^\circ 0^\circ]$ , sendo os valores de referência inicial  $[\varepsilon \lambda] = [30^\circ - 50^\circ]$ . As respostas dos sistemas simulado e real podem ser vistas nas Figuras 9 e 10.

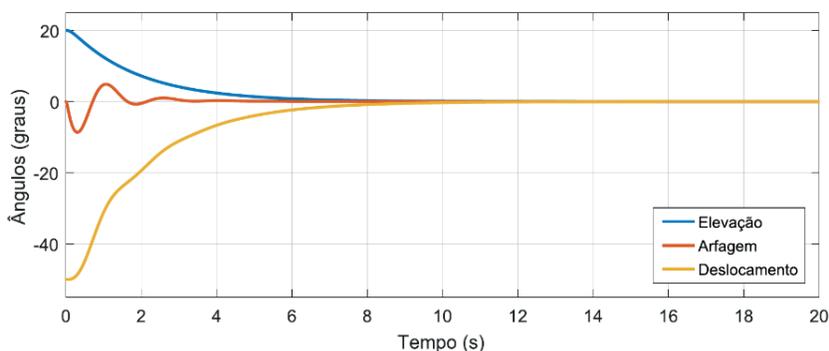


Figura 9 – Resposta à condições iniciais do sistema simulado.

Fonte: Autoria própria.

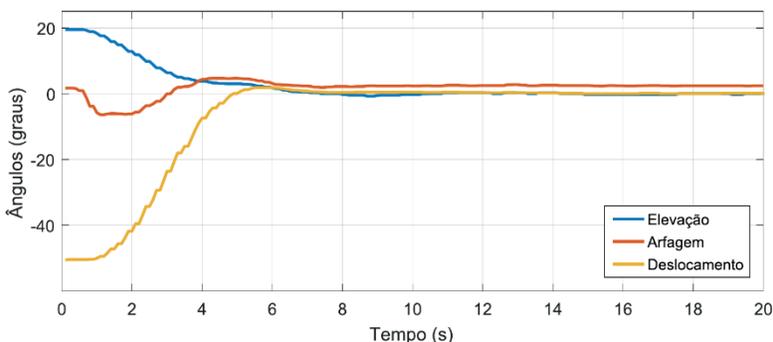


Figura 10 – Resposta à condições iniciais do sistema real.

Fonte: Autoria própria.

Observando as Figuras 9 e 10, nota-se uma dinâmica mais lenta para convergência do sistema real, mas um tempo de regime transitório muito próximo do simulado. Uma característica importante a ser analisada, é a posição do eixo de arfagem em regime permanente, que permanece com um erro de  $e_p = 3,2^\circ$ . Tal comportamento faz-se presente pela parte integral para os outros dois eixos, assim o eixo de arfagem é utilizado para compensar e levar os ângulos  $\varepsilon = \lambda = 0^\circ$  em regime permanente.

Os dados obtidos nas simulações, demonstram que a realimentação do sistema simulado em malha fechada, gera ganhos coerentes visto que o sistema converge para a origem e se mantém estável em regime permanente.

## 6.2 Resposta ao degrau

Quanto a verificação do sistema em relação a estabilidade na troca de referência, a resposta ao degrau é analisada. Um sinal de onda quadrada é gerado para troca de referência em uma frequência de  $0,04 \text{ Hz}$ , para a posição  $\varepsilon = 15^\circ$  e  $\lambda = 30^\circ$ .

A execução desse teste para os eixos de elevação e deslocamento, é relacionado a se o sistema consegue retornar para o ponto de equilíbrio, e analisar sua dinâmica. Tanto o sistema real quanto o simulado se adaptam a mudança de referência convergindo para o ponto de equilíbrio setado no início dos testes. Tal comportamento pode ser visualizado nas Figuras 11 e 12 para o eixo de elevação e as Figuras 13 e 14 para o eixo de deslocamento.

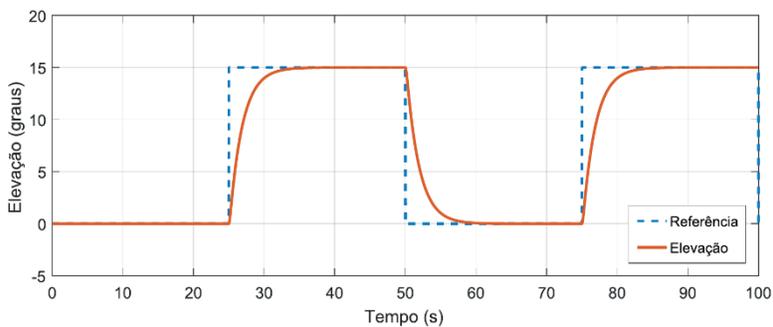


Figura 11 – Resposta ao degrau de aplicado ao ângulo de elevação do sistema simulado.

Fonte: Autoria própria.

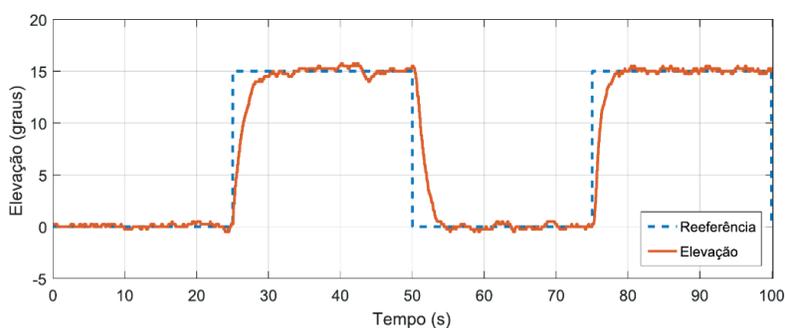


Figura 12 – Resposta ao degrau de aplicado ao ângulo de elevação do sistema real.

Fonte: Autoria própria.

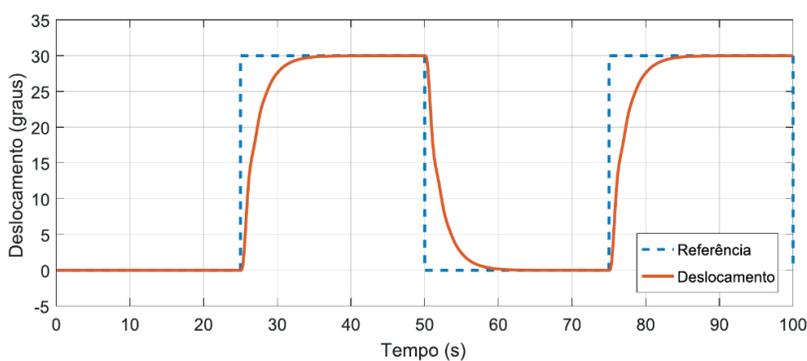


Figura 13 – Resposta ao degrau de aplicado ao ângulo de deslocamento do sistema simulado.

Fonte: Autoria própria.

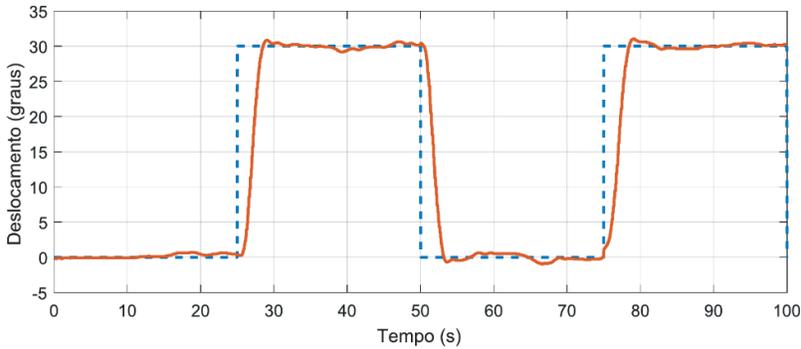


Figura 14 – Resposta ao degrau de aplicado ao ângulo de deslocamento do sistema real.

Fonte: Autoria própria.

## 7 | CONCLUSÃO

De modo geral, a metodologia abordada na execução do projeto alcançou os objetivos propostos no início da pesquisa. A modelagem matemática realizada elucida as características do sistema em estudo, contemplando a metodologia aplicada. Pode-se observar a coerência quando feita a comparação dos dados adquiridos nas simulações do modelo teórico, com os obtidos em testes no sistema real, mostrando-se uma alternativa válida e consistente.

O controlador projetado foi eficaz na resolução do problema de regulação em torno do ponto de equilíbrio estimado, demonstrando que o modelo obtido exibe uma representatividade do sistema real. Destaca-se a relevância desse estudo em problemas similares que envolvam situações de modelagem e projeto de controladores que garantam a estabilidade para o estado de mínima energia do sistema.

No contexto do modelo matemático, pode-se contribuir realizando outras metodologias de modelagem, como por equações Lagrange ou até mesmo, estudar o sistema como um atuador robótico. Também sugere-se a implementação de controladores não lineares, de arquitetura robusta ou controle adaptativo.

## REFERÊNCIAS

Apkarian, J., Lévis, M. & Fulford, C., 2012. **LABORATORY GUIDE 3 DOF Helicopter Experiment for MATLAB/Simulink Users**, Quanser Inc..

Chabir, A., Boukhniher, M., Bouteraa, Y., Chaibet, A. & Ghommam, J., 2016. **Modelling and fixed order robust control of aerial vehicle: Simulation and experiment results**. *COPEL: The International Journal for Comutation and Mathematics in Electrical and Eletronic Engineering*, 35(3), 1064-1085.

Franklin, G.F., Powell, J.D. & Emami-Naeini, A., 2013. **Sistemas de controle para engenharia**. Bookman Editora.

Khizer, A.N., Yaping, D., Ali, S.A. & Yang, X.X., 2014. **3DOF model helicopter with hybrid control**. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computation Science*, 12(5), 3863-3872.

Ogata, K. & Severo, B., 2011. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall do Brasil.

Ragnini, F. & Peccin, V.B., 2016. **Controle de elevação de um helicóptero de três graus de liberdade utilizando realimentação linearizante**. *Instituto Federal de Santa Catarina IFSC Chapecó*.

Rajappa, S., Chriette, A., Chandra, R. & Khalil, W., 2013. **Modelling and dynamic identification of 3DOF Quanser helicopter**. *International Conference on Advanced Robotics*, 1-6.

Rothe-Neves, M., Silva, O.F. & Barreiros, J.A.L., 2004. **Metodologia para a construção de protótipos didáticos para os cursos de controle e automação de sistemas**. *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE*.

SIEMENS, 2019. **PID control with PID\_Compact for SIMATIC S7-1200/S7-1500**. <https://sie.ag/2KT9mwm>. Acesso em agosto, 2019.

Sini, S., Vivek, A. & Nandagopal, J., 2017. **Development and control of laboratory helicopter**. *2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*, 1-6. IEEE.

Yu, Y., Lu, G., Sun, C. & Liu, H., 2015. **Robust backstepping decentralized tracking control for a 3DOF helicopter**. *Nonlinear Dynamics*, 82(1-2), 947-960.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

AMI 1, 2, 3, 4, 5, 7, 12, 124

Aneel 6, 52, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 84, 96, 127, 136, 209, 221

Aterramento 25, 27, 28, 29, 32, 34, 37, 38, 72, 77, 209

Automação 1, 7, 25, 26, 32, 33, 37, 61, 138, 149, 164, 168, 169, 325, 330, 333, 341

### C

Classificação 1, 12, 126, 128, 131, 134, 135, 136, 184, 209

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

Consumo de Energia 4, 83, 84, 138, 161, 172, 181, 259, 260

Curto-Circuito 65, 100, 126, 128, 131, 132, 133, 134, 135, 234

### D

Danos Elétricos 71, 72, 73, 76, 80, 82

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

Densidade de potência 13, 15, 16, 17, 19

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

Distribuição de Energia Elétrica 72, 81, 96, 112, 113, 125, 127, 210, 221, 222

DPS 71, 72, 77, 78, 79, 80, 81

### E

Ensaio 97, 98, 99, 103, 104, 108, 109, 111, 219, 324

Estudo comparativo 13, 15, 275

### I

IEC 61850 54, 55, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 207, 330, 331, 332, 333, 339, 340, 341, 342

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

### L

Linhas de transmissão 54, 56, 62, 64, 65, 112, 113, 227, 240, 327

### M

Medição 1, 3, 4, 7, 8, 11, 54, 58, 59, 60, 64, 79, 80, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 95, 96, 106, 138,

140, 141, 142, 217, 218, 219, 220, 221, 271, 272, 331, 338

Medidores Inteligentes 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

Motor de indução 13, 14, 19, 97, 98, 100, 101, 102, 104

Motor de indução trifásico 97, 98, 100, 101, 104

## **N**

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

## **P**

Previsão de Demanda 112, 113, 114, 115, 119, 124, 125

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

Proteção Diferencial 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69

## **Q**

Qualidade de energia 1, 11, 76, 96, 126, 127, 128, 217

## **R**

Redes Neurais Artificiais 112, 115, 126, 128, 136

Rendimento 15, 16, 19, 20, 95, 97, 98, 101, 102, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 301

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

## **S**

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

Smart Grid 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12, 192, 193, 195, 207, 341

Subestação 29, 83, 84, 95, 96, 112, 115, 116, 124, 331

## **T**

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

Transformador 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 132, 212, 213, 221, 313, 337

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

## **V**

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16