

Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



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
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. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale 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
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. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl 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
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 Miraniide 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

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
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª 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
Profª 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. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª 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. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
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
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
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/UFGA
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 Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia 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
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª 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
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª 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
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª 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: o mundo sob perspectivas avançadas

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: o mundo sob perspectivas avançadas / 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 978-65-5983-013-8
DOI 10.22533/at.ed.138211305

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
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

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica 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. 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
FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN Carolina Barbosa Amaro Dias DOI 10.22533/at.ed.1382113051	
CAPÍTULO 2	14
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES Laura Vieira Maia de Sousa Paula Meyer Soares DOI 10.22533/at.ed.1382113052	
CAPÍTULO 3	30
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA UFAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE) Pedro Henrique Melo Costa Thiago Melo de Lima Antonio Carlos Alves de Farias Rennard de Oliveira Brito DOI 10.22533/at.ed.1382113053	
CAPÍTULO 4	44
ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF Licinius Dimitri Sá de Alcantara Mayara Soares Campos DOI 10.22533/at.ed.1382113054	
CAPÍTULO 5	57
TÉCNICA PREDITIVA DE SEGUIMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA GLOBAL DE ARRANJOS FV EM SOMBREAMENTO PARCIAL Paulo Robson Melo Costa Lucas Taylan Ponte Medeiros Isaac Rocha Machado Marcus Rogério de Castro DOI 10.22533/at.ed.1382113055	
CAPÍTULO 6	76
ANÁLISE DE TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V APLICADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS Ana Lyvia Pereira Lima de Araújo Arthur Vinicius dos Santos Lopes Adson Bezerra Moreira DOI 10.22533/at.ed.1382113056	

CAPÍTULO 7.....	94
METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO E MANEJO DE CARGA APLICADA A CONSUMIDORES RESIDENCIAIS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	
Andrei da Cunha Lima	
Laura Lisiane Callai dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.1382113057	
CAPÍTULO 8.....	113
ESTUDO DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DE ÚNICO ESTÁGIO COM CONEXÃO DIRETA AO SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO	
Lucas Taylan Ponte Medeiros	
Paulo Robson Melo de Costa	
Ângelo Marcilio Marques dos Santos	
Leonardo Pires de Sousa Silva	
Denisia de Vasconcelos Mota	
Adson B. Moreira	
DOI 10.22533/at.ed.1382113058	
CAPÍTULO 9.....	129
ESTUDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	
André Favetta	
Daniel Augusto Pagi Ferreira	
Maurício José Bordon	
DOI 10.22533/at.ed.1382113059	
CAPÍTULO 10.....	142
ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO.	
Neolmar de Matos Filho	
Dênio Alves Cassini	
Túlio Pinheiro Duarte	
Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.13821130510	
CAPÍTULO 11.....	156
THE IMPACT OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL ELECTRICAL PARAMETERS ON LIGHTNING OVERVOLTAGES DEVELOPED IN A 138 KV TRANSMISSION LINE	
Felipe Mendes de Vasconcellos	
Fernando Augusto Moreira	
Rafael Silva Alípio	
DOI 10.22533/at.ed.13821130511	
CAPÍTULO 12.....	170
A INFLUÊNCIA DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO SOBRE O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
Felipe Mendes de Vasconcellos	

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130512

CAPÍTULO 13..... 189

AVALIAÇÃO DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO NA RESPOSTA IMPULSIVA DO ATERRAMENTO E NAS SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Felipe Mendes de Vasconcellos

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130513

CAPÍTULO 14..... 207

CONVERSORES E INVERSORES PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO

Moisés de Mattos Dias

Niklaus Veit Lauxen

Marco Antônio Fröhlich

Claudionor Atilio Vingert

Giuseppe Guilherme Mergener Vingert

Luiz Carlos Gertz

Alessandro Sarmiento dos Santos

José Lesina Cezar

Patrice Monteiro de Aquim

Jonathan Moling

Gabriel Mateus Neumann

Nickolas Augusto Both

Monir Goethel Borba

Lirio Schaeffer

DOI 10.22533/at.ed.13821130514

CAPÍTULO 15..... 221

ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FRENAGEM REGENERATIVA E SEU IMPACTO NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR BATERIAS

Gabriel Silva de Marchi Benedito

Daniel Augusto Pagi Ferreira

DOI 10.22533/at.ed.13821130515

CAPÍTULO 16..... 238

PATH PLANNING COLLISION AVOIDANCE USING REINFORCEMENT LEARNING

Josias Guimarães Batista

Emerson Verar Aragão Dias

Felipe José de Sousa Vasconcelos

Kaio Martins Ramos

Darielson Araújo de Souza

José Leonardo Nunes da Silva

DOI 10.22533/at.ed.13821130516

CAPÍTULO 17.....	252
CONTROLE DE PRECISÃO PARA PRÓTESES MECÂNICAS	
Haniel Nunes Pereira Pinheiro	
Ronaldo Domingues Mansano	
DOI 10.22533/at.ed.13821130517	
CAPÍTULO 18.....	266
ESTUDO DA VIABILIDADE DO MEDIDOR DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA FLOW™ E ADAPTAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS	
Camila de Souza Gomes	
Ana Carolina Silva de Aquino	
Gabriela Haydee Mayer de Figueiredo Barbosa	
Maria Eduarda Santos Amaro	
Sergio Murilo Castro Cravo de Oliveira	
Lilian Regina de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.13821130518	
CAPÍTULO 19.....	280
OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO	
Gustavo Krause Vieira Garcia	
Antonio Lucas dos Santos Carlos	
Neemias Dantas Fernandes	
Taciano Amaral Sorrentino	
DOI 10.22533/at.ed.13821130519	
CAPÍTULO 20.....	297
ESTUDO DA SECAGEM SOLAR DE BIOMASSA DE LARANJA COM CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA	
Mariana de Miranda Oliveira	
Leandro Antônio Fonseca Domingues	
Andrea Lucia Teixeira Charbel	
DOI 10.22533/at.ed.13821130520	
CAPÍTULO 21.....	307
ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CAPACITOR TÉRMICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA	
Brenda Fernandes Ribeiro	
Antonio Gomes Nunes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130521	
CAPÍTULO 22.....	321
MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO TIPO GANGORRA DE EIXO ÚNICO	
Reinel Beltrán Aguedo	
Ricardo José de Farias Silva	
Ania Lussón Cervantes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130522	

CAPÍTULO 23..... 335

DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS NO RIO GRANDE DO NORTE

Paulo Vinícius de Souza Oliveira
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra
Luiz José de Bessa Neto
Vitória Caroline Carvalho do Nascimento

DOI 10.22533/at.ed.13821130523

CAPÍTULO 24..... 350

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DIDÁTICA COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EM UM AMBIENTE DE CÓDIGO ABERTO - SCIENTIFIC LABORATORY (SCILAB)

Matheus Silva Pestana
Danúbia Soares Pires
Orlando Donato Rocha Filho

DOI 10.22533/at.ed.13821130524

CAPÍTULO 25..... 363

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO APLICADO A CONSTRUÇÃO CIVIL

Mauricio Andrade Nascimento
Ednildo Andrade Torres

DOI 10.22533/at.ed.13821130525

CAPÍTULO 26..... 391

MONITORAÇÃO REMOTA DE RESERVATÓRIOS LÍQUIDOS UTILIZANDO O MÓDULO ESP32-LoRa

Maria Eduarda Aparecida Gil
Thiago Timoteo Henrique
Getúlio Teruo Tateoki

DOI 10.22533/at.ed.13821130526

CAPÍTULO 27..... 397

S.A.C SISTEMA DE ASSISTÊNCIA AO CICLISTA

Ricardo Bussons da Silva
Alexandre Henrique Ferreira Rodrigues
Deivid Roberto Almeida Vasconcellos
Rian Guilherma Braga de Lima
San-Cleir Neto Silva Orlanlandes
Victor Manoel Rosa de Moraes

DOI 10.22533/at.ed.13821130527

CAPÍTULO 28..... 402

UMA ABORDAGEM BASEADA EM APRENDIZADO DE MÁQUINA E DESCRITORES ESTATÍSTICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Lucas de Oliveira Soares

Luiz Alberto Pinto
Diego Assereuy Lobão

DOI 10.22533/at.ed.13821130528

SOBRE OS ORGANIZADORES	415
ÍNDICE REMISSIVO.....	416

MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO TIPO GANGORRA DE EIXO ÚNICO

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão: 14/03/2021

Reinel Beltrán Aguedo

Universidade Federal Rural de Pernambuco
- Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
<http://lattes.cnpq.br/2770313428458626>

Ricardo José de Farias Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco
- Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
<http://lattes.cnpq.br/6369929367772349>

Ania Lussón Cervantes

Universidade Federal Rural de Pernambuco
- Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
<http://lattes.cnpq.br/5793691069517813>

RESUMO: Neste artigo, se apresentam a modelagem e o controle de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único. O atuador consiste em uma hélice acoplada a um motor BLDC, para gerar o impulso necessário para estabilizar a plataforma no ângulo de inclinação desejado. A modelagem é realizada usando equações fenomenológicas para o atuador e a gangorra, onde os parâmetros aerodinâmicos das hélices são estimados a partir dos testes de empuxo do conjunto motor-hélice. O conhecido controlador

PID é usado como algoritmo de controle. O Matlab/Simulink é empregado para realizar o ajuste do controlador e as simulações em malha fechada. Os ensaios experimentais são realizados embarcando o controlador no microcontrolador a bordo do protótipo. Os resultados de simulação são comparados com os experimentais para verificar o desempenho do algoritmo de controle. Finalmente, esta plataforma pode ser usada para o controle de *roll* e *pitch* de veículos aéreos não tripulados (VANT's) e para o ensino abordando temas de modelagem e controle de sistemas dinâmicos.

PALAVRAS - CHAVE: Controlador PID; *Seesaw Propeller*; VANT; Controle de sistemas; Motor BLDC.

MODELING AND CONTROL OF AN EXPERIMENTAL SINGLE-AXIS SEESAW PLATFORM

ABSTRACT: In this article, the modeling and a control of a single-axis seesaw platform are presented. The actuator consists of a propeller coupled to a BLDC motor, to generate the necessary thrust to stabilize the platform at a desired angle of inclination. The modeling is performed using phenomenological equations for both the actuator and the seesaw, where propellers aerodynamic parameters are estimated from the thrust tests of the motor-propeller assembly. The well-known PID controller is used as the control algorithm. The Matlab/Simulink is used to adjust the controller and closed loop simulations. Experimental tests are performed by loading the controller into the

microcontroller on board the prototype. Simulation results are compared with the experimental ones to verify the performance of the control algorithm. Finally, the platform can be used to control the roll and pitch movement of unmanned aerial vehicles and for teaching addressing themes of modeling and control of dynamic systems.

KEYWORDS: PID controller; Seesaw Propeller; VANT; Systems control; BLDC motor.

1 | INTRODUÇÃO

Os veículos aéreos não tripulados (VANT's), também chamados de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ou drones, tem tido um aumento significativo em seu uso, como por exemplo, na agricultura de precisão, na fiscalização dos recursos hídricos, na supervisão de linhas de transmissão, de dutos de fluidos e gases, na supervisão do tráfego urbano, na proteção de fronteiras, no mapeamento do desmatamento na Floresta Amazônica, e até para bombardear inimigos (Goodarzi F. et al. 2014), (Luna T. L. et al. 2011), (Shukla A. et al. 2016), (Shakhatreh H. et al. 2019), (Wang B. et al. 2010).

Os UAV's podem ser classificados em dois grandes grupos: asas fixas e asas rotativas. Dentro do segundo grupo estão os multirotores, e em particular, o quadricóptero tem sido um dos mais populares, o qual usa quatro rotores de empuxo vertical para sua propulsão, colocados, normalmente, nas extremidades da estrutura, e no centro dela toda a lógica de medição e controle. Eles são caracterizados pela alta manobrabilidade, podendo decolar e pousar em espaços reduzidos, além de subir e descer verticalmente. Desde o ponto de vista dinâmico, possuem um comportamento inerente não-linear e instável, resultando em uma dinâmica complexa. Estes fatos, junto ao auge no uso em diversas aplicações e áreas, tem gerado grande interesse na comunidade científica, onde pesquisas são voltadas a otimizar o seu desempenho, partindo desde seu desenho mecânico até o desenvolvimento de estratégias de controle de posicionamento, pouso, decolagem e seguimentos de trajetórias de forma precisa e com uma ótima rejeição às perturbações do meio (Santana, L. V. et al. 2012), (Gomes, L. L. et al. 2014), (Mohamed A. M. A. 2019), (Ben Moussa Sellali B., et al. 2017).

Por outro lado, plataformas de laboratório de UAV's são relativamente custosas e complexas, as quais exigem amplos espaços para operar, restrições de manobrabilidade e segurança. Neste sentido se faz necessário poder contar, a nível de laboratório, com plataformas básicas para testar e avaliar projetos de controle, evitando ou minimizando possíveis danos físicos uma vez que o controlador de voo seja embarcado no protótipo final da aeronave.

Na literatura reportam-se vários trabalhos, como por exemplo, Erol U., et al. (2012) apresentam o projeto e controle de posição de uma plataforma do tipo gangorra, cujo movimento angular é medido por um codificador e controlado por um propulsor em um dos extremos do sistema. Como algoritmo de controle é usado o PID padrão e suas variantes proporcional (P), proporcional-integrativo (PI) e proporcional-derivativo (PD). Resultados de

simulação são comparados com os experimentais para avaliar as estratégias de controle. Também estudaram o efeito da hélice no comportamento do sistema como um todo.

Em Kim, J. et al. (2012) se expõe a construção de uma plataforma do tipo gangorra com dois propulsores, para estudar e avaliar o projeto de controladores de atitude. A resposta do sistema é obtida usando um controlador P e um PD para agregar amortecimento ao sistema controlado. Os resultados de simulação são comparados com os experimentais, verificando o desempenho dos controladores. Por outro lado, Mohammad H. et al. (2019) descrevem a dinâmica e o controle de atitude de uma plataforma do tipo gangorra com dois propulsores. Como controlador é usado o algoritmo PID, o qual foi sintonizado experimentalmente via prova e erro. Resultados mostraram a efetividade deste para o controle de rolagem e arfagem em UAV's.

Finalmente, Nils G., et al. (2012) oferecem uma ferramenta educativa e de desenvolvimento do tipo gangorra que permite avaliar sistemas de controle aviônico. O sistema é monitorado em tempo real por um painel de controle implementado no LabVIEW e podem ser considerados dois casos: o primeiro permite a estabilização do sistema em uma inclinação desejada, ajustando os parâmetros do PID baseado na resposta temporal. O segundo considera dois atuadores, onde é possível sintonizar o PID para a estabilização em uma inclinação desejada, além de uma velocidade requerida no sistema. A ferramenta possibilita familiarização com o sensor de inclinação e sua calibração para melhorar a qualidade dos dados medidos.

Assim, o presente artigo tem como objetivo a modelagem e o controle de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único (*seesaw propeller*) como o intuito de realizar estudos básicos de atitude em UAV's. Este tipo de plataforma também é de grande utilidade no ensino no que tange à modelagem e controle de sistemas dinâmicos.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelagem do sistema *Seesaw Propeller*

O sistema *seesaw propeller*, veja a Figura1, consiste em uma plataforma do tipo gangorra de eixo único, onde em uma de suas extremidades é acoplado um propulsor, a fim de controlar a posição da haste.

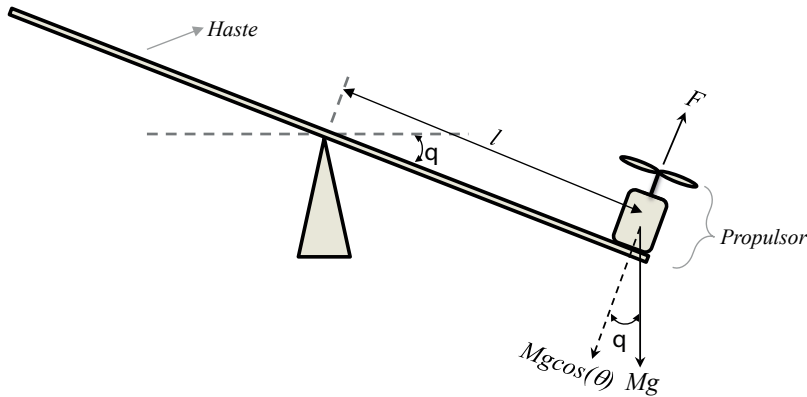


Figura1- Seesaw propeller

Fonte: Autoria própria

O propulsor é formado por um motor de corrente contínua sem escovas (BLDC), acoplado a uma hélice, de forma a gerar a força de empuxo, F , que atua para manter a plataforma equilibrada em uma determinada posição angular, q , com relação à horizontal. No modelo, M representa a massa do motor, l a metade do comprimento da distância entre o centro do propulsor e o apoio da gangorra, e g a aceleração da gravidade.

O movimento da haste é descrito pelo torque em torno do seu centro. Assim, um modelo não linear que descreve a dinâmica do sistema é dado por:

$$J_G \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = l(F(t) - Mg \cos \theta(t)) \quad (1)$$

em que J_G é o momento de inércia do sistema.

A equação da dinâmica da hélice é definida como (Takashi et al. 2014):

$$J_h \frac{d\omega_h(t)}{dt} = F(t) - Q(t) \quad (2)$$

onde J_h é o momento de inércia da hélice, F a força de empuxo e Q o contra-torque.

Tanto a força de empuxo como o contra-torque podem ser definidos em função dos parâmetros da hélice como a seguir:

$$F(t) = \frac{C_T \rho D_p^4}{4\pi^2} \omega_h^2(t) \quad (3)$$

$$Q(t) = \frac{C_D \rho D_p^5}{4\pi^2} \omega_h^2(t) \quad (4)$$

nas quais, C_T é o coeficiente de empuxo, C_D o coeficiente de arrasto, ρ a densidade do ar, D_p o diâmetro da hélice e ω_h a velocidade angular da hélice.

Por outro lado, a potência consumida pelo motor ao girar a hélice é (Barnes W. M. 1995).

$$P(t) = \frac{C_p \rho D_p^5}{8\pi^3} \omega_h^3(t) \quad (5)$$

onde C_p é o coeficiente de potência do motor, o qual segundo pode ser relacionado ao C_Q como da seguinte forma:

$$C_p = 2\pi C_Q \quad (6)$$

Como visto, a força de empuxo e o contra-torque podem ser obtidos de forma analítica, mas dependem de coeficientes que sua determinação não é simples, já que estes, por sua vez, vão depender da geometria, dos efeitos aerodinâmicos e mecânicos das hélices e do motor usados, porém nem sempre condizem com a realidade. Não obstante, tais coeficientes podem ser determinados por meio de testes experimentais de maneira razoável.

Os motores BLDCs são amplamente usados na construção de UAV's multirotores já que apresentam alta eficiência, pouca geração de calor e uma boa controlabilidade. Na bibliografia existem diversas maneiras de descrever o funcionamento de um motor, para determinar as equações que regem este, foi adotada uma modelagem baseada nas equações fenomenológicas para um motor de corrente contínua (CC), que consiste em uma resistência em série com uma indutância, à qual se aplica uma entrada (V_s), bem como é levado em consideração as propriedades mecânicas do motor, ver Figura 2.

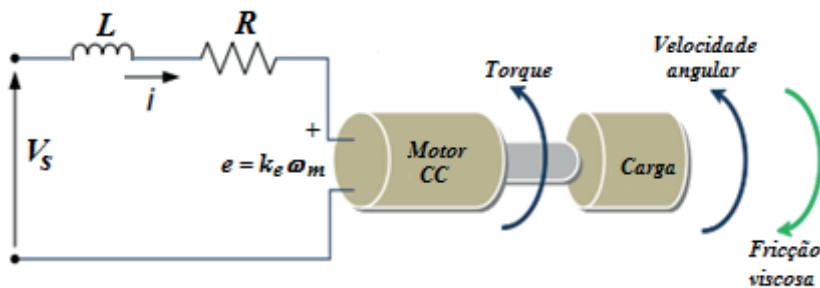


Figura 2 - Diagrama em blocos de um motor BLDC

Fonte: Adaptado de Oguntoyinbo, O. J. 2009

Portanto, a partir da Lei de Kirchhoff aplicada ao circuito e da aplicação da segunda Lei de Newton considerando as propriedades mecânicas do motor, como torque, velocidade angular e momento de inércia, obtêm-se as seguintes equações:

$$L \frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e \omega_m(t) + V_s(t) \quad (7)$$

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = k_t i(t) - k_f \omega_m(t) - T_L(t) \quad (8)$$

onde R é a resistência da armadura e L sua indutância, i a corrente de armadura, ω_m a velocidade angular do motor, J_m o momento de inércia do rotor, k_p , k_t e k_e as constantes de atrito, torque e força contra-eletromotriz, respectivamente, $T_L(t)$ o torque de carga, que nesse caso é o torque produzido pelo arrasto da hélice, assim $T_L(t) = Q(t)$. Considerando J como sendo o momento inercia do conjunto motor-hélice e $\omega_m = \omega_h = \omega$, então:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_t V_s(t)}{JR} - \left(\frac{k_t k_e + Rk_f}{JR} \right) \omega(t) - \frac{C_D \rho D_p^5}{4\pi^2} \omega^2(t) \quad (9)$$

Na Figura 3 se representa o diagrama em blocos do conjunto motor-hélice conforme descrito em (9).

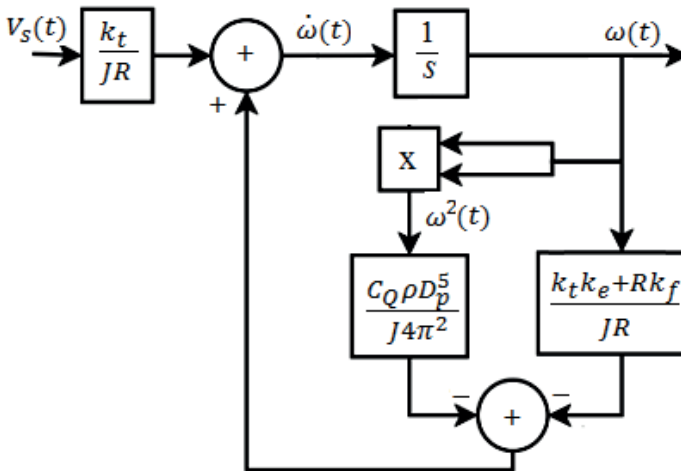


Figura 3 - Diagrama em blocos do conjunto motor-hélice

Fonte: Autoria própria

Finalmente pode-se relacionar as equações anteriormente apresentadas, a fim de obter que descreve o funcionamento do sistema apresentado na Figura 1. Tendo em vista que $F(t)$ é a força de empuxo resultante do movimento do conjunto motor-hélice, é possível utilizar (3) em (1):

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{l}{J_G} \left(\frac{C_i \rho D_p^4 \omega^2(t)}{4\pi^2} - Mg \cos(\theta(t)) \right). \quad (10)$$

2.2 Controlador PID

O controlador PID é muito utilizado, tanto no meio acadêmico, quanto industrial, onde mais da metade dos controladores em uso atualmente emprega controladores PID ou PID modificado (Ogata, K. 2010). A forma mais frequentemente encontrada na indústria é a chamada forma padrão como mostrado em (11).

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (11)$$

em que u é a saída, e o erro, K_p , T_i e T_d são o ganho proporcional, o tempo integral e derivativo, respectivamente.

Uma importante observação é que ao termo derivativo não é aplicado na forma pura, pelo fato deste amplificar ruídos, bem como também não poder ser implementado fisicamente. Assim, se aplica um filtro na ação derivativa, como mostrado em (12) no domínio de Laplace.

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{s T_d}{1 + s T_d / N} \right) E(s) \quad (12)$$

onde N é um parâmetro de ajuste do filtro, tipicamente entre 2 e 20 (Åström, K. J. et al. 1995).

Para implementar a equação do controlador PID em um microcontrolador, é necessário que (12) seja reescrita em sua forma discreta. Assim, o controlador PID foi discreto considerando a aproximação derivativa (*backward difference*) pelo de possuir bons resultados para todos os valores de T_d , incluindo $T_d=0$ (Åström, K. J. et al. 1995).

$$\begin{aligned} u(kh) = & t_0 y_{sp}(kh) + t_1 y_{sp}(kh-h) + t_2 y_{sp}(kh-2h) \\ & - s_0 y(kh) - s_1 y(kh-h) - s_2 y(kh-2h) \\ & + (1 + a_d) u(kh-h) - a_d u(kh-h) \end{aligned} \quad (13)$$

com

$$\begin{aligned} s_0 &= K_p + b_{i1} + b_d; & s_1 &= -K_p(1 + a_d) - b_{i1}a_d + b_{i2} - 2b_d; \\ s_2 &= K_p a_d - b_{i1}a_d + b_d; \\ t_0 &= K_p b + b_{i1}; & t_1 &= -K_p b(1 + a_d) - b_{i1}a_d + b_{i2}; \\ t_2 &= K_p b a_d - b_{i2}a_d; \\ b_{i1} &= K_p h / T_i; & b_{i2} &= 0; & a_d &= T_d / (T_d + Nh); \\ b_d &= K_p T_d N / (T_d + Nh). \end{aligned} \tag{14}$$

onde y_{sp} e y são a entrada de referência e a saída do sistema, respectivamente, b é uma constante de ponderação de referência e h é o tempo de amostragem.

3 I DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Os componentes principais da plataforma são uma hélice acoplada a um motor BLDC, um controlador eletrônico de velocidade (ESC), uma unidade de medição inercial (IMU), um microcontrolador e o suporte. A Figura 4 mostra a plataforma experimental e na Figura 5 o diagrama em blocos do circuito elétrico.

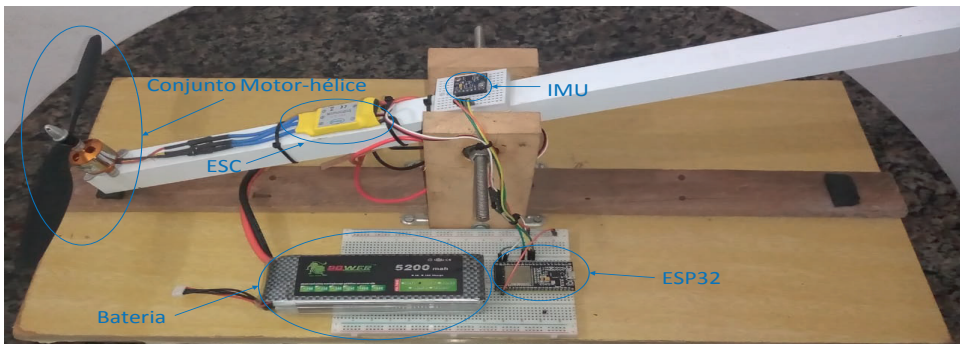


Figura 4 - Plataforma experimental do sistema

Fonte: Autoria própria

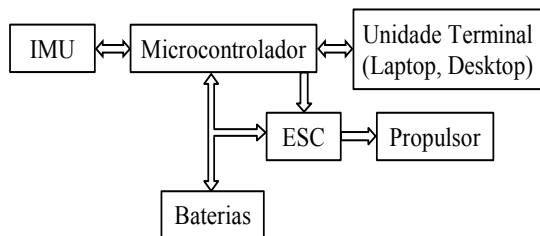


Figura 5 - Diagrama em blocos do circuito elétrico

Fonte: Autoria própria

Na Figura 6 são mostrados os componentes eletrônicos na construção da plataforma experimental. O motor BLDC é o modelo A2212/13T de 1000 KV, e para controlar a sua velocidade é usado um ESC. Para este modelo de motor, o fabricante sugere o uso de um ESC de 30 A, e também as hélices modelo EPP1045. Como microcontrolador foi escolhido a ESP32, destacando-se por seu poder de processamento, baixo custo, e por possuir Wi-Fi e Bluetooth integrados, facilitando seu uso. As fontes de alimentação usadas são duas baterias, uma de 5200 mAh para alimentar os propulsores, e outra de 1000 mAh para alimentar o microcontrolador e a IMU. A IMU é o multi-sensor GY-87, o qual chega a 10 DOF (*Degree Of Freedom*), capaz de medir a velocidade angular, a orientação e as forças gravitacionais de um objeto em movimento através de um acelerômetro e giroscópio triaxial MPU-6050, um magnetômetro triaxial HMC5883L, e um sensor de pressão e temperatura BMP180.



Figura 6 – Componentes

Fonte: Sites dos próprios fabricantes

Para o sistema é usado os dados fornecidos pelo giroscópio e acelerômetro na obtenção do ângulo de inclinação da gangorra.

4 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Na Figura 7 se mostra o sistema em malha fechada considerando como saída o ângulo da gangorra θ .

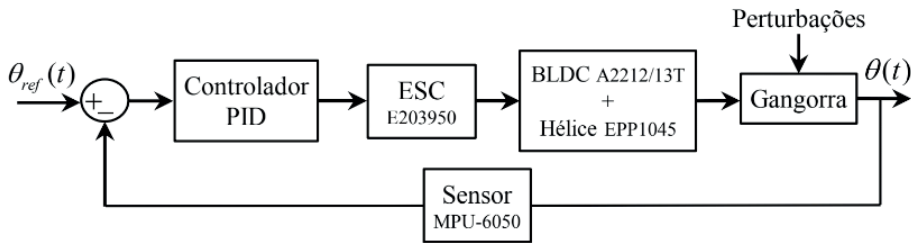


Figura 7 - Sistema em malha fechada

Fonte: Autoria própria

O coeficiente de empuxo dado em (3), pode ser estimado de maneira experimental. Para isto, se consideram os resultados experimentais dados em Paula, J. C. (2012), onde se relaciona o empuxo à velocidade e potência do motor. Assim, usando as relações dadas em (5) e (6) foram estimados os coeficientes C_T e C_Q de acordo com (3) e (4), respectivamente. Desta forma $C_T = 0.05933$ e $C_Q = 0.0088$.

O Matlab/Simulink possui a ferramenta PID *Autotuning* para a sintonia do controlador PID usando um modelo da planta. Com esta ferramenta é possível determinar os parâmetros do controlador ajustando tanto o comportamento transitório, quanto a estado estacionário do sistema em malha fechada. O ajuste obtido é útil como ponto de partida para depois refinar os parâmetros em tempo real, uma vez que o código do controlador é embarcado no microcontrolador de bordo no sistema real. Assim, foram obtidos os seguintes parâmetros de sintonia: $K_p = 0,10$, $K_i = 0,03$ e $K_d = 0,10$ onde $K_T = K_p/T_i$ e $K_d = K_p T_d$.

Uma vez sintonizado o controlador, se procede à validação via simulação do sistema controlado. Para isto, se consideram as situações seguintes: $\theta_{ref} = 0$ e condição inicial de -27 , $\theta_{ref} = -10$ e condição inicial de 0 . Como as simulações foram satisfatórias para a sintonia do controlador (ver Figura 8), seguiu-se para a implementação prática. Para um melhor funcionamento é realizado um ajuste fino experimental do controlador, chegando nos seguintes valores $K_p = 0,3$, $K_i = 0,0018$ e $K_d = 0,4$. A discrepância entre os parâmetros do controlador, obtidos via simulação e de forma experimental, pode-se dar já que o modelo do sistema é obtido de acordo com certas considerações feitas como, por exemplo, a ausência

do atrito no sistema, o que pode levar a que o sistema real apresente um comportamento não idêntico como o esperado via simulação.

Resultados de simulação e experimentação são apresentados na Figura 8. Se pode observar que a máxima amplitude das oscilações ocorre entorno dos 3°, com picos pontuais em determinados momentos devido às acelerações e desacelerações próprias do propulsor. No entanto, o comportamento do sistema se comparados com os simulação são bem semelhantes, tanto nas amplitudes, quanto no tempo de assentamento e o máximo de sobressinal. As maiores diferenças se devem, principalmente, nas oscilações do sistema real, devido a que as forças contrárias ao empuxo são baixas, pois o propulsor utilizado é capaz de erguer até 660 g e a gangorra apresenta um peso de aproximadamente 70 g. Portanto, por menor que seja o aumento da velocidade do propulsor acaba por gerar as oscilações observadas.

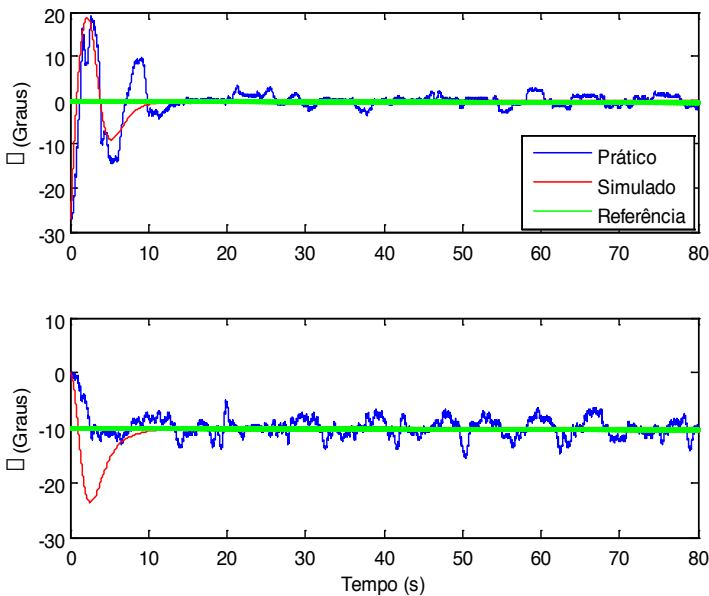


Figura 8 - Resultados de simulação e experimentação com referência.

Fonte: Autoria própria

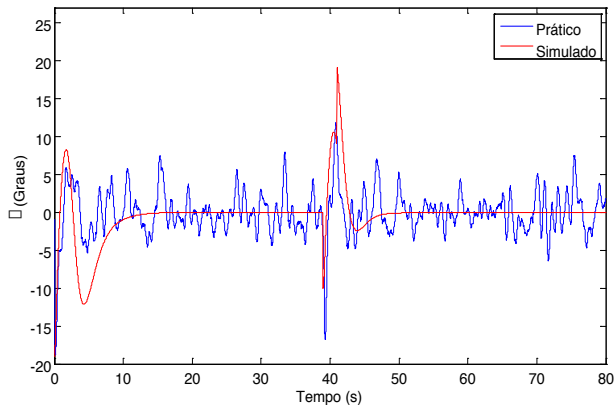


Figura 9 - Resultados de simulação e experimentação com perturbação.

Fonte: Autoria própria

A Figura 9 mostra os resultados para o sistema perturbado por meio da aplicação de uma força externa, manual, nos 40 s, considerando $\theta_{ref} = 0^\circ$ e condição inicial de -19° . Como se observa, o controlador teve uma boa rejeição à perturbação, a qual foi de -15° , sendo exagerada com o intuito de observar a robustez do controlador.

5 | CONCLUSÕES

Foi apresentada a modelagem, simulação e o controle PID de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único com um único propulsor. A sintonia inicial do PID foi realizada usando o PID *Autotuning* do Matlab/Simulink, e depois os parâmetros do controlador foram refinados em base à resposta em tempo real do sistema. O controlador PID se mostrou robusto na rejeição à perturbação e com um bom desempenho na estabilização tanto no transitório, quanto a estado estacionário. Assim, o PID se mostra, ainda, como uma boa opção tanto no seguimento de trajetória quanto na rejeição a perturbações.

Desde uma perspectiva educacional, a plataforma pode ser usada na aprendizagem de assuntos interdisciplinares, como por exemplo, modelagem de sistemas dinâmicos, estudo do algoritmo de controle PID e suas variantes, além do projeto e implementação de outras técnicas de controle, como alocação de polos, IMC, controle por modo deslizante, linearização por realimentação, MPC e Fuzzy. Desta forma, os estudantes conseguirão visualizar de maneira prática temas relacionados à modelagem e controle de sistemas inerciais autônomos, especificamente os quadrirotores, os quais vêm-se mostrando de grande utilidade nas diversas áreas da sociedade atual.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, através do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PIC) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

REFERÊNCIAS

Åström, K. J. and Hägglund, T. (1995). **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society; 2nd Edition. United States of America.

Ben Moussa Sellali B. and Allali A. (2017). **Neuro — Fuzzy methods coupled to operational PID, to improve the flight parameters of a drone**. 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 314-319. Monastir.

Barnes, W. M. (1995). **Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics**. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New-York.

Erol U., Turgay A., Onur K., Lutfi M. (2012). **Position Control of a Seesaw like Platform by Using a Thrust Propeller. The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control**. March 25-27, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

Goodarzi F., Lee D. e Lee T. (2014). **Geometric stabilization of a quadrotor uav with a payload connected by flexible cable**. American Control Conference (ACC), 4925–4930. Portland.

Gomes, L. L., Leal L., Oliveira T. R., S. da Cunha J. P. V. S. (2014). **Controle de um veículo quadrirrotor usando um sistema de captura de movimentos**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, 1474- 1481. Belo Horizonte, MG, Brasil.

Kim, J., Roh, M., Song, J., Song, W., Kang, B., and Kim, J. (2012). **An Experimental Study of a Single Axis Seesaw Attitude Control Consisting of Motor and Propeller**. The Journal of Advanced Navigation Technology, 16 (1), 1–7.

Luna T. L., Sanca A. S., Alsina P. J., Medeiros A. D., Guimarães J. P. F. (2011). **Posicionamento de um veículo aéreo não tripulado para detecção de corrosões**. Petro & Quimica, 34 -38. Brasil.

Mohamed A. M. A. and AbuElgasim A. E. (2019). **Controlling Drone—using IOT platform**. International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 1-4. Khartoum, Sudan.

Mohammad H. and Md. Nadim B. W. (2019). **Seesaw Dynamics and Control-Experimental Study**. Journal of Mechanical Robotics, 4(2), 1-7.

Nils G., Atheel R. and Sergio M. (2012). **Avionic control systems for education and development**. Proceedings of INTED2012 Conference. 5th-7th March 2012, Valencia, Spain.

Ogata, K. (2010). **Engenharia de Controle Moderno**. 5^a Edição. Pearson Education do Brasil, São Paulo.

Oguntoyinbo, O. J. (2009). **PID Control of Brushless DC Motor and Robot Trajectory Panning and Simulation with MATLAB/SUMULINK**. Degree Programme of Information Technology, Vaasan Ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences, Finland.

Paula, J. C. (2012). **Desenvolvimento de um VANT do tipo quadricóptero para obtenção de imagens aéreas em alta definição**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Shukla A., Xiaoqian H. and Karki H. (2016). **Autonomous tracking of oil and gas pipelines by an unmanned aerial vehicle**. *IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 1-4. Abu Dhabi.*

Shakhatreh H., Sawalmeh A. H., Al-fuqaha A., Dou Z., Almaita E., Khalil I., Othman N. S., Khreishah A., and Guizani M. (2019). **Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges**. In *IEEE Access*, 7, 48572-48634.

Santana, L. V., Filho, M. S., Carelli, R. (2012). **Modelagem e controle não linear subatuado de um quad-rotor: Parte 1**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012), 449-454. Campina Grande, Brasil.

Takahashi K., Fujimoto H., Hori Y., Kobayashi H. and Nishizawa A. (2014). **Modeling of propeller electric airplane and thrust control using advantage of electric motor**. *IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 482-487. Yokohama.

Wang B., Chen X., Wang Q., Liu L., Zhang H. and Li B. (2010). **Power line inspection with a flying robot**. *1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. Montreal, QC, Canada.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizagem 33, 238, 239, 251, 332, 350, 351, 352, 357, 359, 361, 362

ATP 156, 157, 158, 159, 170, 171, 173, 176, 177, 179, 189, 191, 192, 195, 196, 198, 255

Autonomia veicular 221

B

Backflashover 157, 163, 169, 170, 171, 172, 181, 182, 183, 184, 185, 190

C

Cargas Variáveis 76, 92

Célula fotovoltaica 61, 115, 116, 129, 145

Confiabilidade 2, 142, 143, 145, 151, 152

Conversores 8, 58, 59, 85, 86, 207, 208, 214, 216, 219

D

Dados Meteorológicos 38, 42, 44, 54

Descarbonização 14, 16, 17, 18, 23

Descargas Atmosféricas 156, 157, 170, 171, 174, 176, 183, 185, 189, 191, 193, 195, 204

Desempenho 5, 7, 6, 7, 47, 54, 76, 77, 78, 80, 86, 91, 92, 113, 117, 125, 127, 142, 145, 147, 151, 153, 157, 170, 171, 172, 176, 178, 185, 190, 197, 208, 212, 219, 224, 225, 226, 229, 232, 233, 234, 237, 251, 320, 321, 322, 323, 332, 348, 349, 395, 400, 402, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 413

Desenvolvimento 6, 1, 2, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 28, 30, 31, 37, 38, 42, 45, 51, 76, 94, 111, 114, 130, 143, 153, 208, 209, 212, 213, 219, 220, 223, 229, 236, 252, 258, 263, 264, 268, 269, 275, 277, 282, 289, 296, 307, 308, 320, 322, 323, 333, 334, 348, 351, 352, 357, 361, 364, 365, 367, 368, 370, 372, 374, 376, 388, 389, 391, 398, 400, 404

E

Eficiência Energética 6, 16, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 45, 209, 219, 222, 237, 363, 365, 367, 374, 378, 380, 387, 390

Energia fotovoltaica 7, 40, 77, 96, 113, 129, 130, 131, 135, 137, 374

Energia Solar 16, 30, 33, 34, 44, 45, 46, 47, 49, 51, 55, 56, 77, 78, 95, 130, 133, 138, 140, 141, 143, 152, 208, 219, 287, 294, 297, 298, 301, 308, 320, 335, 336, 337, 341, 344

F

Fontes Renováveis 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 77, 115, 131, 143

Frenagem Regenerativa 8, 221, 222, 223, 236, 237

G

Geração de Trajetória 239

GMPPT 57, 58, 75

I

Inversores 8, 136, 138, 207, 208, 210

Irradiação Incidente 44, 55

M

Manipulador Robótico 238, 239

Módulo fotovoltaico 62, 76, 77, 78, 84, 90, 91, 117, 119, 129, 131, 145, 146, 150, 151, 290

Módulos Fotovoltaicos 7, 33, 34, 61, 62, 63, 76, 77, 79, 83, 92, 99, 107, 110, 117, 122, 124, 130, 131, 135, 142, 143, 145, 146, 147, 149, 151, 152, 153

P

Painéis Fotovoltaicos 7, 44, 47, 51, 55, 76, 77, 83, 97, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 139, 140

Parâmetros elétricos do solo 156, 170, 171, 172, 180, 181, 182, 184, 185, 191, 198, 200, 201, 203

Permissividade do solo 157, 171, 178, 185, 189, 190, 197, 203

Pesquisa 5, 6, 23, 25, 29, 30, 31, 34, 37, 40, 41, 42, 43, 56, 96, 132, 143, 152, 222, 266, 268, 276, 277, 278, 298, 305, 350, 352, 362, 371, 372, 375, 379, 381, 382, 398, 400, 404

Planejamento de Caminho 239

Prevenção de Colisão 239

Q

Qualidade de Energia 41, 113

R

Reforço 238, 239, 361

Resistividade do solo 156, 157, 170, 171, 172, 173, 177, 181, 182, 183, 184, 185, 189, 190, 191, 192, 193, 196, 198, 200, 203, 204

Robótica 1, 251

S

Sensores 6, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 39, 40, 58, 59, 66, 80, 104, 105, 119, 208, 287, 288, 289, 290, 300, 396, 403

Setor Elétrico 6, 14, 24, 25, 26, 27, 37

Sinais 1, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 28, 105, 213, 215, 216, 254, 256, 259, 266, 267, 271, 275,

279, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 412

Sistemas de aterramento 157, 170, 171, 177, 190, 191, 196, 198, 203

Sistema Solar Fotovoltaico (FV) 113

Sombreamento Parcial 6, 57, 58, 60, 62, 64, 65, 74, 84

SPPMG 57, 58, 59, 60, 63, 70, 71, 72, 73, 74

T

Topologia de Estágio Único 113, 122, 126

Traçador de curva I-V 6, 76, 77

Transição Energética 6, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29


Trilhas de Caracol 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153

V

Veículo Elétrico 8, 207, 208, 209, 210, 212, 217, 219, 221, 222, 223, 224, 236, 237

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br