

**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](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

## 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 eletricitista 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

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN Carolina Barbosa Amaro Dias DOI 10.22533/at.ed.1382113051	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES Laura Vieira Maia de Sousa Paula Meyer Soares DOI 10.22533/at.ed.1382113052	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>30</b>
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	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>44</b>
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	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>57</b>
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	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>76</b>
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	

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

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

**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**

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>415</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>416</b>

# CAPÍTULO 1

## FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão: 02/02/2021

**Carolina Barbosa Amaro Dias**

Universidade de São Paulo

São Carlos - São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/6922601814968200>

**RESUMO:** É perceptível, hoje em dia, a crescente tendência e necessidade de se integrar o mundo digital ao mundo real, seja num contexto de entretenimento, medicina, segurança, robótica, entre muitos mais. Um dos dispositivos responsáveis pela tradução de dados de um ambiente para outro são os sensores, que captam informações do mundo físico e as convertem em grandezas compreensíveis para um computador que, então, pode interpretá-las e processá-las tendo em vista um objetivo. Os sensores, no entanto, são suscetíveis a erros que podem afetar, em vários níveis de gravidade, o resultado das aplicações em que estão envolvidos. Para contornar esse tipo de problema, algumas técnicas foram desenvolvidas, dentre as quais está o filtro de Kalman, cuja implementação é feita em *software*. O filtro consiste num conjunto de equações matemáticas que aumenta a eficiência do algoritmo de aquisição de dados realizando uma combinação ponderada das informações advindas dos sensores. O objetivo final desse projeto foi a validação da utilização do filtro de Kalman para obtenção de dados mais precisos para o contexto da fusão de um acelerômetro e um giroscópio.

**PALAVRAS - CHAVE:** robótica, sinais, sensores

### INERTIAL SENSORS FUSION BASED ON KALMAN FILTER

**ABSTRACT:** It is evident, nowadays, the growing trend and necessity to merge the digital world to the real world, it can be seen when it comes to entertainment, medicine, safety, robotics, among many more. One of the devices responsible for translating data from one environment to another are the sensors, which capture information from the physical world and convert it into palpable quantities for a computer, which then can interpret and process it in order to achieve a certain goal. Sensors, however, are prone to errors that can affect, at various levels of severity, the result of the applications in which they are involved. To avoid this type of problem, some techniques have been developed, one of which is the Kalman filter, which is implemented *via* software. The filter consists of a set of mathematical equations that increases the efficiency of the data acquisition algorithm by performing a weighted combination of information from the sensors. The goal of this project was to validate the use of the Kalman filter to obtain more accurate data when combining an accelerometer and a gyroscope.

**KEYWORDS:** robotics, signals, sensors

### 1 | INTRODUÇÃO

O progresso das áreas de ciência dos materiais e da engenharia foram cruciais para o desenvolvimento de sensores – dispositivos capazes de prover uma saída aproveitável em

resposta a uma grandeza medida. O desenvolvimento e aperfeiçoamento de sensores é importante em diversos contextos relacionados ao progresso da tecnologia de maneira global (EROR *et al*, 1995).

Atualmente, em geral, sensores geram sinais de natureza elétrica, frequentemente aplicados a técnicas de controle digital. Estão presentes, por exemplo, nos avanços da medicina, tanto para o diagnóstico quanto para o tratamento, para segurança e monitoramento de uma maneira geral, além de controle num ambiente industrial (ELECTROCHEM, 2020).

Para descrição da performance de um sensor são levados em consideração parâmetros como sua sensibilidade, precisão e linearidade. Um parâmetro que tem muita influência sobre o êxito de suas aplicações é sua exatidão, que descreve a diferença entre o real valor da grandeza medida e o valor indicado pelo instrumento (CARR & BROWN, 1981). Na prática, não há sensor cuja exatidão é perfeita e cujas medidas não são afetadas por ruídos. Por isso, diversas estratégias foram desenvolvidas para conferir maior confiabilidade aos dados coletados.

Uma dessas técnicas é o filtro de Kalman, método bastante utilizado quando se deseja atenuar o efeito de ruídos via *software*. Ele consiste num conjunto de equações matemáticas que fazem a predição do estado desejado e correção desse valor a partir da medição em si. Esse algoritmo também é muito utilizado para combinação das medidas de dois ou mais sensores de maneira ponderada para melhor estimativa das variáveis desejadas, estratégia conhecida como fusão de sensores (OLIVEIRA & GONÇALVES, 2017).

Nesse projeto, foi estudada a aplicação do algoritmo do filtro de Kalman para fusão de dois dos sensores que compõem as unidades de medidas inerciais (IMUs) – o acelerômetro e o giroscópio – de forma a estimar os valores de dois dos três ângulos que descrevem a atitude de um objeto: a rolagem (representada por  $\phi$ ) e a arfagem (representada por  $\theta$ ). Os sinais foram obtidos de em ambiente simulado, com o *software* V-REP, e posteriormente processados utilizando-se o *software* Matlab.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 O Algoritmo do Filtro de Kalman

O algoritmo do filtro de Kalman é aplicado a sistemas cujo modelo representado no espaço de estados é do tipo:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases}$$

A primeira equação representa o modelo do processo. Nela,  $x$  é o vetor contendo as variáveis de estado e  $A$  relaciona o valor da variável  $x$  no instante atual ( $k$ ) ao no próximo instante ( $k+1$ ). A matriz  $B$  relaciona a variável de controle  $u$  a  $x$ . Para as aplicações desenvolvidas nesse projeto, o termo foi omitido, pois não há ação de controle.  $w$  é a variável de ruído de processo, adicionada para representar a incerteza de conhecimento pleno do modelo.

A segunda equação representa o modelo de medição. A matriz  $H$  relaciona a variável de estado,  $x$ , ao valor medido,  $z$ . O parâmetro  $v$  representa o ruído relacionado ao processo de medição feito pelos sensores (WELCH & BISHOP, 2001).

A partir dos parâmetros  $w$  e  $v$ , obtém-se as  $Q$  e  $R$ , matrizes diagonais constituídas pela variância dessas variáveis, respectivamente (KIM, 2010). Isso conclui o conjunto de todas as variáveis externas ao algoritmo.

As variáveis para cálculos internos são  $K$ , o ganho de Kalman, e  $P$ , a covariância do erro. A matriz  $K$  é utilizada para ponderação de  $z$  e do valor previsto de  $x$  (cuja notação é  $\hat{x}_k^-$ ) para cálculo da estimativa de  $x$ . A matriz  $P$  é a representação numérica da acurácia da estimativa de  $x$  com relação a seu valor real (KIM, 2010).

Uma vez definidas as variáveis envolvidas no algoritmo, os passos que compõem esse processo se seguem da seguinte forma:

PASSO 0: Definição dos valores iniciais para  $x$  e  $P$  ( $x_0$  e  $P_0$ )

PASSO 1: Predição do estado de  $x$  e da covariância do erro ( $P$ )

$$\hat{x}_k^- = A x_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (2)$$

PASSO 2: Cálculo do ganho de Kalman ( $K$ )

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

PASSO 3: Estimativa do valor de  $x$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (4)$$

PASSO 4: Atualização da covariância do erro ( $P$ )

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (5)$$

PASSO 5: Retorno ao PASSO 1, com novo valor de  $z$

## 2.2 A Fusão dos Sensores

### 2.2.1 A Adaptação do Modelo Original

Decidiu-se que a implementação inicial do algoritmo de fusão de sensores seria feita de acordo com o modelo proposto em (KIM, 2010). Em vez de utilizar diretamente os ângulos  $\phi$  e  $\theta$  como variáveis de estado  $x$ , optou-se por utilizar as medidas dos ângulos em quatérnios ( $q1$ ,  $q2$ ,  $q3$  e  $q4$ ) para uma representação mais simples da modelagem do processo considerando as grandezas medidas pelos sensores.

A tradução dos ângulos para esse novo sistema de coordenadas se dá pela equação (6). Vale observar que, apesar do ângulo  $\psi$  estar representado na equação, ele não será utilizado. Assim, a equação é aplicada com  $\psi = 0$ .

$$\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \\ q4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) - \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Utilizando a representação em  $q1$ ,  $q2$ ,  $q3$  e  $q4$ , a relação entre as velocidades angulares e taxa de variação dos ângulos em quatérnios se dá pela equação (7).

$$\begin{pmatrix} \dot{q1} \\ \dot{q2} \\ \dot{q3} \\ \dot{q4} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \\ q4 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Essa equação, em tempo discreto, é representada por (8), em que  $\Delta t$  é o tempo de amostragem utilizado. Assim, obtém-se a equação de modelo do processo:

$$\begin{pmatrix} q1_{k+1} \\ q2_{k+1} \\ q3_{k+1} \\ q4_{k+1} \end{pmatrix} = \left[ I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} q1_k \\ q2_k \\ q3_k \\ q4_k \end{pmatrix} \quad (8)$$

O que significa que:

$$A = \left( I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \right) \quad (9)$$

A variável  $z$  foi alterada para que a equação de modelo de medição utilizada estivesse de acordo com (7), ou seja, as medidas também foram convertidas para quatérnio, resultando em:

$$z_k = Ix_k + v_k \quad (10)$$

Uma vez definido o modelo do sistema como um todo, a fusão de sensores se deu da seguinte forma:

PASSO 1: Cálculo dos valores de  $\phi$  e  $\theta$  a partir dos valores medidos pelo acelerômetro. Nas equações abaixo, admitiu-se a aceleração da gravidade  $g$  como  $9,8\text{m/s}^2$

$$\theta = \text{asin} \frac{a_x}{g} \quad (11)$$

$$\phi = \text{asin} \frac{-a_y}{g \cos \theta} \quad (12)$$

PASSO 2: Converte-se os valores calculados para  $\phi$  e  $\theta$  para quatérnio pela relação descrita por (6). Esses valores serão o  $z$  aplicado ao algoritmo do filtro, sendo atualizados a cada iteração

PASSO 3: Uma vez estimados os valores de  $x$  a partir das medidas do acelerômetro, calcula-se a matriz  $A$  com as medidas do giroscópio com (9)

PASSO 4: Utiliza-se os valores de  $q1$ ,  $q2$ ,  $q3$  e  $q4$  estimados no PASSO 2 e a matriz  $A$  calculada no PASSO 3 para o algoritmo do filtro de Kalman, cujos passos foram descritos na seção 2.1

### 2.2.2 O Algoritmo de Otimização

A performance do filtro de Kalman está intimamente ligada à adequação dos valores de  $Q$  e  $R$  à descrição do sistema. No entanto, o comportamento do ruído de processo e de medição são, muitas vezes, difíceis de se estimar com muita certeza. Por isso, no

geral, eles são encarados como parâmetros a serem regulados ao problema (LAAMARI; CHAFAA; ATHAMENA, 2015).

Inicialmente, os valores adotados foram escolhidos manualmente e alterados com base em tentativas e erro, mas considerando-se a infinidade de valores a serem testados e a incapacidade em se perceber um padrão de resposta de estimação coerente, optou-se por utilizar um algoritmo de otimização para escolha dos valores  $Q$  e  $R$ . A estratégia utilizada foi a de otimização por enxame de partículas.

A otimização por enxame de partículas é uma estratégia desenvolvida em 1995 por Eberhart e Kennedy que tem por base o compartilhamento de informações entre indivíduos pelo bem do coletivo, conceito estudado pela ciência da Sociobiologia (KENNEDY & EBERHART, 1995). Nas palavras do sociobiólogo E. O. Wilson:

Em teoria pelo menos, membros individuais do bando podem se beneficiar de descobertas e experiências prévias de todos os outros membros do bando quando procuram por comida. Essa vantagem pode se tornar decisiva, superando as desvantagens da competição por alimento, quando os recursos estão distribuídos de maneira imprevisível (WILSON, 1975, tradução nossa).

No contexto da otimização global computadorizada, em vez da busca por alimento, o que se procura é o ponto de máximo ou mínimo global de uma função objetivo e, em vez de animais reais, usa-se indivíduos digitais (TÖRN & ŽILINSKAS, 1989). Nesse projeto, procurou-se minimizar a diferença entre os sinais reais que representam as atitudes de um robô e aqueles estimados pelo filtro de Kalman. Assim, a função minimizada foi o erro absoluto entre eles.

Cada partícula do enxame (ou indivíduo da população) tem dois atributos: sua posição ( $x_i$ , em que cada  $i$  representa uma partícula diferente) e sua velocidade ( $v_i$ ). A posição da partícula representa o ponto em que ela se encontra na função objetivo e a velocidade indica a direção e sentido em que a partícula se movimenta pelo relevo da função (LAAMARI; CHAFAA; ATHAMENA, 2015), no caso, a função que descreve a diferença entre o valor real e o calculado da atitude do robô.

A execução desse algoritmo se dá da seguinte forma:

Na primeira iteração, cada partícula do enxame tem seus atributos definidos aleatoriamente. As partículas têm suas posições atualizadas: a nova posição da partícula é a soma de sua posição inicial à velocidade que lhe foi atribuída (grandeza vetorial).

Caso nova a posição da partícula corresponda a um relevo mais baixo do que o anterior, armazena-se essa posição como o melhor desempenho pessoal ( $P_{best}$ ). Para cada iteração e para cada indivíduo, esse valor é atualizado se a movimentação acarretou uma diminuição do valor do erro.

Concomitantemente, armazena-se o melhor desempenho considerando-se todas as iterações e o enxame como um todo ( $G_{best}$ ) – esse passo é o que relaciona o algoritmo ao conceito de compartilhamento da Sociobiologia.

Ao fim da iteração, ou seja, quando todas as partículas já têm suas posições atualizadas, e estão definidos  $P_{best_i}$  e  $G_{best}$ , são calculadas as velocidades a serem utilizadas na próxima iteração. Isso se dá pela equação (13).

$$v_i(k+1) = w \times v_i(k) + c_1 \times r_1(k) \times (P_{best_i}(k) - x_i(k)) + c_2 \times r_2(k) \times (G_{best}(k) - x_i(k)) \quad (13)$$

Na equação acima, é evidente que a velocidade que uma partícula terá na próxima iteração é resultante de uma combinação de três termos, visualmente representados na figura 1.

O primeiro é  $w \times v_i(k)$ , em que  $v_i(k)$  é a velocidade atual atribuída à partícula, e  $w$  é a variável de inércia que, quanto maior for, mais a velocidade atual influenciará a próxima (EBERHART & SHI, 2000). Esse componente é representado pela seta preta na figura 1.

O segundo termo é  $c_1 \times r_1(k) \times (P_{best_i}(k) - x_i(k))$ , chamado de componente cognitiva, representa a experiência individual, em verde na figura 1. Esse produto resulta num vetor partindo da atual posição da partícula até a sua posição de melhor desempenho (seta verde pontilhada na figura 1). O fator  $c_1$  é uma variável que representa uma aceleração positiva e  $r_1$ , um valor randômico entre zero e 1.

O último termo é  $c_2 \times r_2(k) \times (G_{best}(k) - x_i(k))$  chamado de componente social, representa a troca de informações entre membros do enxame, em azul na figura 1. Esse produto resulta num vetor partindo da atual posição da partícula até a posição de melhor desempenho do grupo como um todo (seta azul pontilhada na figura 1). Como para a componente individual, o fator  $c_2$  representa uma aceleração positiva e  $r_2$ , um valor randômico entre zero e 1 (TRIPATHI & JENA, 2016).

Uma vez calculada a velocidade da partícula na próxima iteração, ela é movimentada de acordo com a equação (14).

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (14)$$



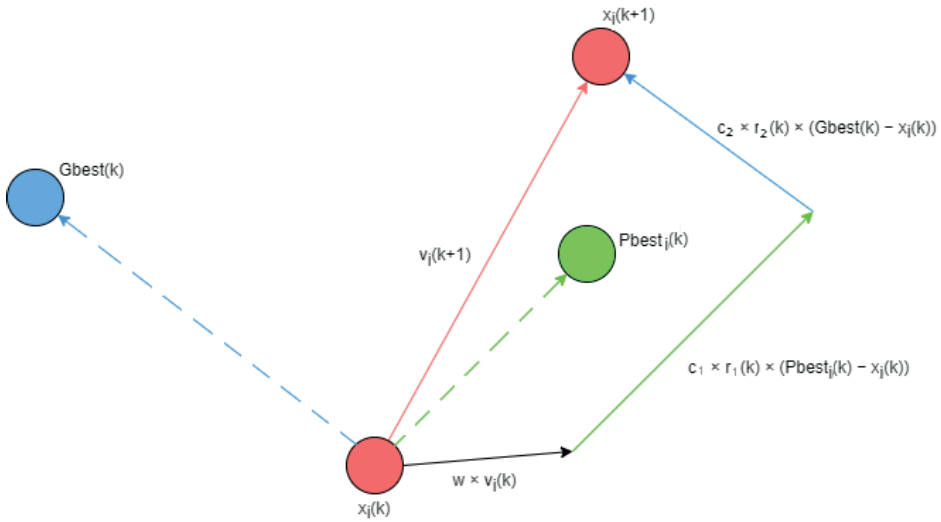


Figura 1: Representação dos componentes envolvidos na movimentação de uma partícula (Adaptado de MACEDO, 2020)

### 3 | RESULTADOS

#### 3.1 Estimativa de Medida dos Sensores

O primeiro item a ser desenvolvido no projeto foi a estimativa das variáveis dos sensores através do filtro de Kalman, ou seja, o algoritmo foi aplicado às medidas dos sensores separadamente para que se obtivesse dados com menor ruído.

No entanto, como esse projeto foi desenvolvido apenas em simulação (cujos sensores não possuem erro de medição), o ruído foi adicionado artificialmente. Escolheu-se a adição de um ruído branco gaussiano aditivo que resultasse numa SNR de 2dB.

As equações gerais descritas na seção 2.1 foram utilizadas da seguinte forma:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ix_k + w_k \\ z_k = Ix_k + v_k \end{cases}$$

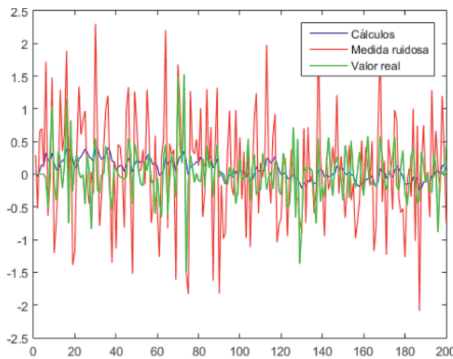
A variável de estado – o valor a ser estimado – foi escolhida como sendo o próprio valor medido pelo sensor. Por isso, fez-se  $H$  como sendo uma matriz identidade. Para a escolha da matriz  $A$ , tomou-se a decisão de presumir que o valor medido pelos sensores varia pouco entre o instante  $k$  e o instante  $k+1$ . Assim, a matriz  $A$  utilizada também foi uma matriz identidade.

Os dois sinais obtidos como resultado dessa aplicação estão representados nas figuras 2(a) e 2(b). Para uma mesma coluna, as três imagens representam um eixo do sensor: para o acelerômetro, esses eixos são  $x$ ,  $y$  e  $z$  e para o giroscópio,  $p$ ,  $q$  e  $r$ .

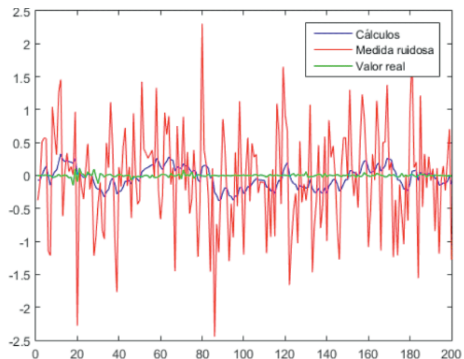
Considerando uma mesma linha, as duas primeiras imagens correspondem aos sinais simulados e calculados, e a última, ao erro absoluto entre o sinal simulado (sem ruído) e o valor previsto pelo filtro de Kalman. A tabela 1 abaixo resume os valores médios de erro absoluto encontrados para cada uma das medidas.

Grandeza	Erro médio absoluto
$a_x$	0.2920
$a_y$	0.1669
$a_z$	0.7152
$p$	0.1401
$q$	0.6198
$r$	0.1309

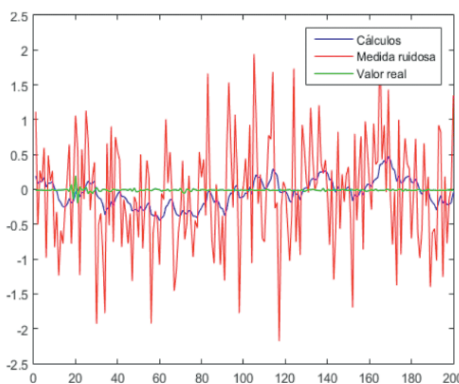
Tabela 1: Erro médio absoluto das estimações do filtro de Kalman



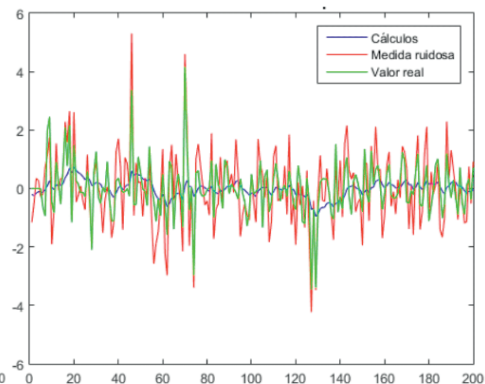
(a) Sinais referentes a  $a_x$



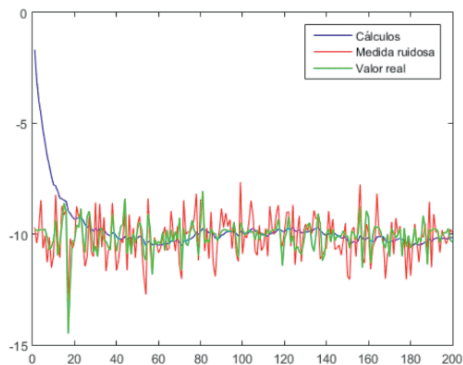
(b) Sinais referentes a  $p$



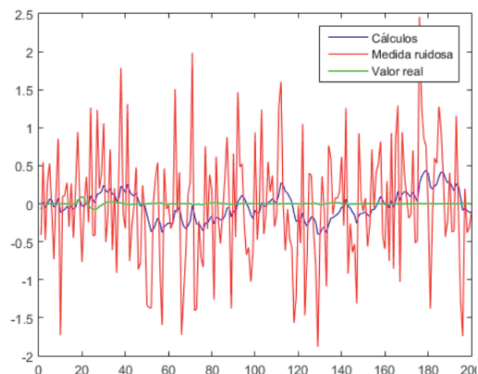
(c) Sinais referentes a  $a_y$



(d) Sinais referentes a  $q$



(e) Sinais referentes a  $a_z$



(f) Sinais referentes a  $r$

Figura 2: Resultados do uso do filtro de Kalman para os sinais provenientes do acelerômetro e giroscópio

### 3.2 Fusão de Sensores

O método da fusão de sensores foi aplicado para cálculo dos ângulos de rolagem ( $\phi$ ) e arfagem ( $\theta$ ) conforme descrito na seção 2.2. Cabe observar que as medidas utilizadas para essa seção foram aplicadas diretamente do *V-REP*, sem a adição de ruído, diferentemente da seção anterior.

O algoritmo de otimização por enxame de partículas foi executado 100 vezes com o objetivo de encontrar os valores mais frequentes para  $Q$  e  $R$ , a fim de evitar mínimos locais. A figura 3 representa um histograma normalizado desses valores.

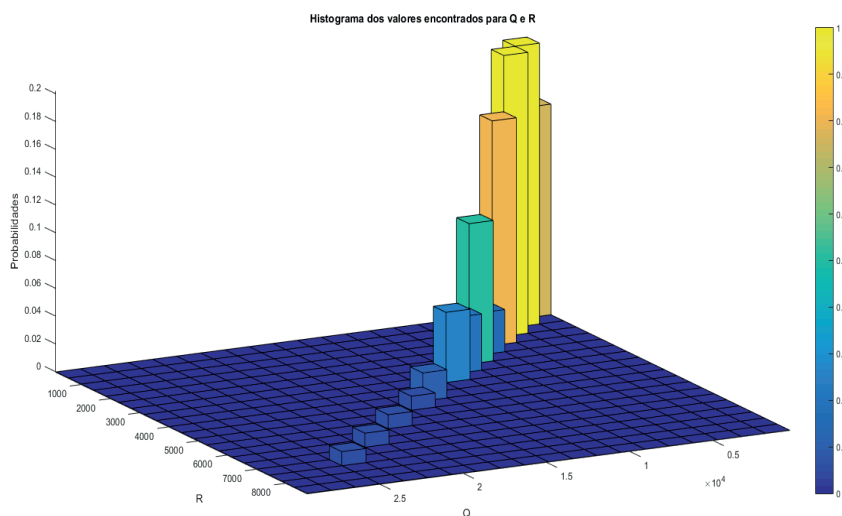


Figura 3: Valores mais comuns de  $R$  e  $Q$  pela otimização

Apesar de haver mais valores de  $R$  perto de 2000 e  $Q$ , de 4000, todos os pares encontrados pelo algoritmo de otimização tiveram o mesmo erro: 17.006. Assim, os valores  $Q$  e  $R$  escolhidos foram 441.17 e 131.19, respectivamente – um dos pares encontrados pelo algoritmo. As figuras 4(a) e 4(b) representam os valores das grandezas  $\phi$  e  $\theta$  estimados pelo filtro de Kalman, enquanto 5(a) e 5(b), os respectivos erros absolutos.

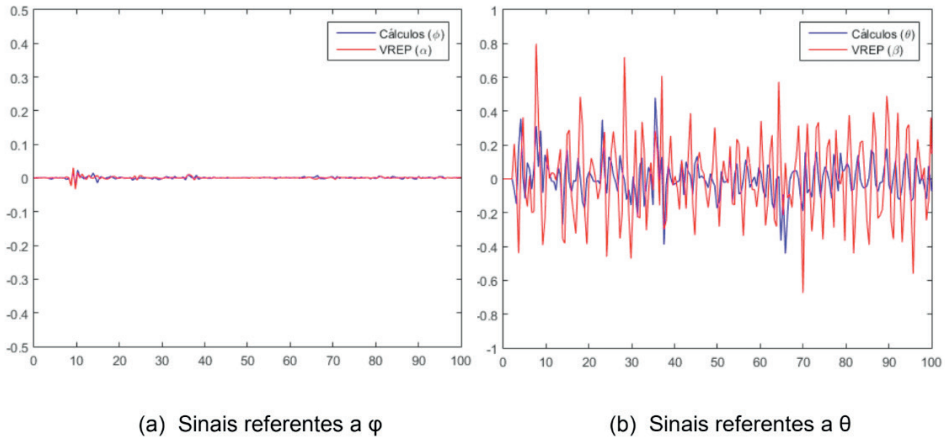


Figura 4: Resultado do filtro de Kalman para fusão de sensores

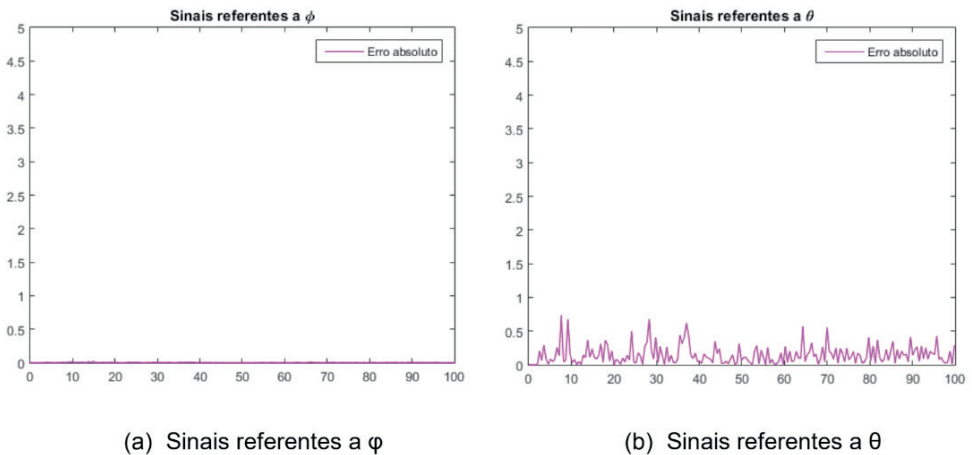


Figura 5: Erro absoluto entre estimativa pelo filtro de Kalman e valor real

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao uso do algoritmo do filtro de Kalman unicamente para minimização do efeito de ruído nos sinais, conforme feito na seção 3.1, pode-se dizer que as grandezas calculadas aproximaram bem o comportamento para sinais de pouca variação. Uma

evidência desse fato está no erro absoluto relacionado às grandezas  $a_j$ ,  $p$  e  $r$ , que podem ser verificados na tabela 1. Isso é explicado pela decisão tomada para descrever a matriz  $A - a$  de que os sinais variariam de maneira lenta, o que nem sempre foi verdade.

Isso também pode ser notado nas figuras 4(a) e 4(b), referentes à fusão dos sensores: o erro absoluto calculado foi menor para  $\phi$ , que teve um comportamento mais suave no decorrer do tempo. No entanto, esse efeito também pode ser relacionado ao fato de que o valor real do ângulo  $\phi$  em si são menores do que para  $\theta$ . O uso do erro relativo em vez do absoluto para essa comparação seria ideal, mas não pôde ser feito devido à existência frequente de valores nulos ou muito próximos a isso.

Outro fato a ser observado nos resultados da fusão de sensores com o filtro de Kalman é o de que o comportamento geral do sinal foi previsto corretamente na maioria das vezes. Ou seja, apesar de as amplitudes calculadas serem inferiores às reais, o sentido dos picos foi acertado.

## REFERÊNCIAS

CARR, J.; BROWN, J. **Introduction to Biomedical Equipment Technology**. 4. ed [S.l.]: Pearson, 2000.

EBERHART, R.; SHI, Y. **Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization**. In: Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512). [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 84–88.

ELECTROCHEM. **World of Sensors**. Disponível em: <<https://www.electrochem.org/world-of-sensors>>. Acessado em: 5 de fevereiro de 2020.

EROR, N. ; COPPERSMITH, S. ; DEAN, P. ; MURRAY, R. ; PEERCY, P. ; ROGERS, C. ; SADOWAY, D. ; THOME, J. ; WAGNER, J. **Expanding the Vision on Sensor Materials**. [S.l.]: National Academy Press, 1995.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. In: Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p.1942–1948 vol.4.

KIM, P. **Kalman filter for beginners with matlab examples**. In: . [S.l.]: A-JIN Publishing Company, 2010.

LAAMARI, Y.; CHAFAA, K.; ATHAMENA, B. **Particle swarm optimization of an extended kalman filter for speed and rotor flux estimation of an induction motor drive**. Electrical Engineering, v. 97, n. 2, p. 129–138, 2015.

MACEDO, I. **Implementing the Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm in Python**. Disponível em: <<https://medium.com/analytics-vidhya/implementing-particle-swarm-optimization-pso-algorithm-in-python-9efc2eb179a6>>. Acessado em: 20 de julho de 2020.

OLIVEIRA W.; GONÇALVES, E. **Implementação em c: Filtro de kalman, fusão de sensores para determinação de Ângulos**. For Science, v. 5, n. 3, 2017.

TÖRN, A.; ŽILINSKAS, A. **Global optimization**. In: Lecture Notes in Computer Science. [S.l.: s.n.], 1989. v. 350, p. 1–2.

TRIPATHI, D. P.; JENA, U. R. **Cognitive and social information based PSO**. African Journals Online, v. 8, n. 3, p. 64–75, 2016.

WELCH, G.; BISHOP, G. **An introduction to the kalman filter**. In: .[S.l.]: University of North Carolina at Chapel Hill, 2001. p. 20.

WILSON, E. **Sociobiology: The new synthesis**. In: . [S.l.]: The Belknap Press of Harvard University Press, 1975. cap. 21, p. 442.

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

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

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

# ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

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

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

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