

**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 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

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN Carolina Barbosa Amaro Dias <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113051</b>	
<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 <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113052</b>	
<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 <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113053</b>	
<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 <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113054</b>	
<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 <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113055</b>	
<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 <b>DOI 10.22533/at.ed.1382113056</b>	

<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 Atílio 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>

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

Data de aceite: 01/05/2021

### Lucas de Oliveira Soares

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo  
Serra – ES  
<http://lattes.cnpq.br/0530283146210335>

### Luiz Alberto Pinto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo  
Serra – ES  
<http://lattes.cnpq.br/3550111932609658>

### Diego Assereuy Lobão

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo  
Serra – ES  
<http://lattes.cnpq.br/2646841619816534>

**RESUMO:** Esse trabalho faz uma análise do desempenho dos classificadores *k-Nearest Neighbor*, *Support Vector Machine*, *Decision Tree* e *Random Forest*, para a classificação de falhas em rolamentos de máquinas elétricas rotativas a partir de sinais de vibração coletados em diferentes condições de operação, isto é, condição de funcionamento normal e com a introdução de diversas condições de falhas simuladas artificialmente. Os descritores utilizados para a construção dos modelos foram extraídos dos sinais de vibração, a partir de

parâmetros estatísticos no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizados nos testes foi o *CWRU Bearing Dataset*, e os resultados mostram que os descritores estatísticos apresentam boa separabilidade das classes favorecendo o desempenho dos modelos de classificação, que obtiveram taxas superiores a 99% de acurácia com os classificadores implementados pelos algoritmos *Decision Tree* e *Random Forest*.

**PALAVRAS - CHAVE:** diagnóstico de falhas em rolamentos; descritores estatísticos; extração de características; random forest, cwru data set.

### A MACHINE LEARNING AND STATISTICAL DESCRIPTORS BASED APPROACH FOR FAILURE DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINERY BEARINGS

**ABSTRACT:** This work analyzes the performance of the *k-Nearest Neighbor*, *Support Vector Machine*, *Decision Tree* and *Random Forest* classifiers, when used to classify bearing failures in rotating electrical machines based on vibration signals collected in different operating conditions, that is, normal operating condition and after the introduction of several artificially simulated failure conditions. The descriptors used to construct the models were extracted from the vibration signals applying statistical parameters in the time domain. The data set used in the tests was the *CWRU Bearing Dataset*, and the results show that the statistical descriptors present good class separability, favoring the performance of the classification models, which obtained classification rates greater than 99% with the classifiers implemented by the *Decision Tree* and *Random Forest* algorithms.

**KEYWORDS:** bearing failure diagnosis; statistical descriptors; feature extraction; random forest; cwru data set.

## 1 | INTRODUÇÃO

Ambientes industriais são constituídos por diferentes tipos de equipamentos que fazem parte de sistemas de produção complexos. Entre os diversos tipos de equipamentos que operam nesses ambientes, um dos mais importantes e mais sujeitos a falhas são as máquinas rotativas. Dessa forma, a utilização de técnicas de manutenção eficientes é importante para que esses equipamentos estejam sempre em condições de produção. As estratégias mais eficientes de manutenção consistem no monitoramento automático contínuo das condições de funcionamento das máquinas rotativas, através da coleta e análise de sinais por elas produzidas quando em funcionamento. A implantação de tal estratégia em um ambiente industrial pode reduzir os custos das intervenções e os tempos de parada da produção.

A utilização de técnicas de monitoramento automático das condições de funcionamento de equipamentos através da análise dos sinais do processo, podem auxiliar na identificação, no diagnóstico e na eliminação das falhas em máquinas rotativas. Os autores em ZHANG et al. (2017), afirmam que modelos de diagnóstico de falhas baseados em métodos orientados a dados são vantajosos, pois, podem fornecer diagnósticos precisos, mesmo sem o conhecimento do modelo do processo. Nesses métodos, os diagnósticos são elaborados a partir de dados que, de forma geral, são facilmente obtidos por sensores.

Pela sua natureza dinâmica, quando em funcionamento as máquinas rotativas são submetidas a ação de forças centrífugas, forças de atrito e forças resultantes da vibração das partes móveis ou de folgas no conjunto. Devido a esse sistema de forças atuando sobre o equipamento, as partes móveis sofrem desgastes operacionais, que com o tempo podem resultar no aparecimento de falhas e em quebras intempestivas.

Nesse contexto, os mancais de rolamento se tornam as partes mais sensíveis e sujeitas a falhas das máquinas rotativas. Sob condições adequadas de operação e conservação os mancais de rolamento podem reduzir os efeitos das ações das referidas forças sobre o conjunto, prevenindo o aparecimento de alguns tipos de falhas. De acordo com ZHANG et al. (2019), que investigou a probabilidade de ocorrência de falhas em máquinas rotativas, problemas em rolamentos são responsáveis por cerca de 30% a 40% de todas as falhas nessas máquinas. Como, geralmente, condições anormais de funcionamento de rolamentos se manifestam na forma de vibração, o monitoramento dessa variável é uma das principais ferramentas para acompanhamento das condições de funcionamento das máquinas.

Os mancais de rolamento são partes essenciais das máquinas rotativas industriais, e a manutenção das boas condições de funcionamento dessas partes é fundamental para

a saúde operacional desses equipamentos, e por conseguinte para a manutenção das condições operacionais dos equipamentos industriais. Outro importante aspecto a ser considerado é a grande quantidade de informações, na forma de dados, que podem ser extraídas dos processos através das modernas técnicas de instrumentação disponíveis (CHEN et al., 2019). Nesse contexto, a utilização de técnicas de *Machine Learning* e *Deep Learning* pode ser utilizadas para o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico automáticos de falhas em equipamentos, como por exemplo, rolamentos de motores elétricos, que é o objeto desse estudo.

Este trabalho aborda a utilização de técnicas de *Machine Learning*, *k-Nearest Neighbor*, *Support Vector Machine*, *Decision Tree* e *Random Forest*, para classificação de falhas extraídas de sinais de vibração produzidos por rolamentos de máquinas elétricas. O conjunto de dados utilizado é o da *Case Western Reserve University - CWRU*, disponível abertamente para estudos na área acadêmica. O objetivo é apresentar o desempenho destas ferramentas de classificação em função dos descritores extraídos do sinal vibracional e dos modos de operação do equipamento em função das cargas de trabalho.

Na sequência este trabalho está constituído pelas seguintes seções: a Seção 2 contém a revisão do estado da arte sobre diagnóstico de falhas; a Seção 3 apresenta uma descrição sucinta dos algoritmos de classificação empregados; a Seção 4 traz uma descrição das etapas executadas na realização da pesquisa; a Seção 5 reúne os resultados obtidos e a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas de diagnóstico têm como base a detecção e a classificação das condições anormais de funcionamento. Devido a sua importância no setor industrial, diversos pesquisadores têm se dedicado a estudar a aplicação de técnicas de *Machine Learning* na elaboração de diagnóstico de falhas em sistemas industriais.

Os autores em RAUBER et al. (2015) estudaram a classificação de sinais de vibração utilizando os algoritmos *k-Nearest Neighbors (k-NN)*, *Support Vector Machine (SVM)* e Redes Neurais Artificiais *Multilayer Perceptron (MLP)* para o diagnóstico de falhas em rolamentos. Neste trabalho, são comparados os desempenhos dos classificadores quando implementados com a utilização de descritores obtidos com base em modelos estatísticos, *Wavelet Package Analysis* e análise complexa de envelope. Para a redução da dimensionalidade os autores utilizaram Análise de Componentes Principais - *PCA* e seleção de características, sendo que os melhores resultados foram obtidos por métodos de seleção de características. O modelo construído pela combinação de *Wavelet Package* e o *k-NN* apresentou 99,82% de acurácia, sendo este o melhor valor encontrado.

Em NAYANA e GEETHANJALI (2017), foi estudada a modelagem de sinais de vibração para a detecção de falhas em rolamentos, através de parâmetros estatísticos no

domínio do tempo. Os descritores estatísticos utilizados para a construção dos modelos foram o comprimento de forma de onda (*WL*), alterações no sinal de inclinação (*SSC*), integral de sinal simples (*SSI*), amplitude de Wilson (*WAMP*), valor absoluto médio (*MAV*) e cruzamento zero (*ZC*) sendo estes comparados com os descritores convencionais tais como desvio padrão (*STD*), variância (*VAR*), assimetria (*SKW*), valor médio (*Mean*), raiz média quadrática (*RMS*) e curtose (*KURT*). O estudo realizou a análise dos descritores citados, com uso dos classificadores implementados pelos algoritmos *Naive Bayes (NB)*, *SVM* e *Linear Discriminant Analysis (LDA)*. A validação dos modelos foi realizada pela técnica de *k-Fold Cross Validation* com 10 *folds*. Na comparação final do método proposto, com uso dos descritores *WL*, *SSC*, *SSI*, *WAMP*, *MAV* e *ZC* contra os descritores convencionais no domínio do tempo, todos os classificadores atingiram 100% de acurácia, independente da carga do motor do experimento. Trabalhos realizados por outros autores utilizando o mesmo conjunto de dados, porém com descritores diferentes (*STD*, *VAR*, *SKW*, *Mean*, *RMS* e *KURT*), obtiveram resultados entre 73% e 99%.

Em TAHIR et al. (2017) os autores propuseram uma abordagem para melhoria da acurácia na classificação de falhas em rolamentos de esferas utilizando preditores extraídos dos sinais de vibração no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizados foi obtido em um simulador de falhas na universidade de Curtin-Austrália. Além da classe relacionada ao funcionamento normal, foram registradas medições associadas a problemas nas pistas interna e externa do rolamento. Para a classificação, dez descritores estatísticos no domínio do tempo foram extraídos dos sinais de vibração, que constituíram os dados de entrada para os classificadores *SVM*, *BayesNet*, *Decision Table* e *Decision Tree (DT)*. Segundo os autores, a abordagem proposta apresentou vantagens substanciais em relação ao custo computacional, pois a utilização dos referidos descritores resultou em modelos eficientes para os sinais de vibração, permitindo a representação deles por uma pequena quantidade de descritores estatísticos, sem perda substancial de informação. Os modelos com os descritores *RMS* e variância, em todos os casos atingiram o valor de 100%. Os classificadores com pior desempenho foram aqueles obtidos com descritores extraídos por valores médios e mediana no algoritmo *DT*, com valores de 73% e 84% respectivamente.

No trabalho de DEY et al. (2019) é proposta a utilização da técnica de autocorrelação com os sinais no domínio do tempo para a detecção de falhas em rolamentos de esferas. Para a obtenção dos modelos os autores extraíram os descritores estatísticos, valor máximo, desvio padrão, variância e valores de pico a pico dos correlogramas construídos. Na etapa de classificação, foram utilizados os algoritmos *Random Forest (RF)* e *k-NN*, e a metodologia consistiu na divisão dos processos em três problemas binários e um problema multi-classes. Ambos os classificadores apresentaram acurácia de 100%, o que segundo os autores superou os resultados até então relatados.

Trabalhos recentes mostram uma tendência no uso de técnicas de redes neurais e algoritmos genéticos para diagnóstico de falhas em rolamentos. TOMA et al. (2020)

apresenta uma combinação de técnicas que envolve a utilização de métodos estatísticos, algoritmo genético (AG) e técnicas de aprendizado de máquina para o diagnóstico de falhas em motores. Os descritores são extraídos dos sinais de corrente elétrica com a utilização de AG. Modelos de classificação baseados em *k-NN*, *DT* e *RF* são treinados e aplicados a identificação de falhas nos rolamentos do equipamento. Os autores relatam taxas de acerto superiores a 97%.

Os autores em AGRAWAL e JAYASWAL (2019) fizeram um estudo comparativo entre uma rede neural artificial (RNA) e *SVM* para o diagnóstico e classificação de falhas em rolamento utilizando *wavelets* contínuas e entropia. Os resultados indicaram o melhor desempenho do *SVM*, que obteve acurácia de 100%, contra 96% das redes neurais.

Em ZHOU et al. (2019) é utilizada uma Rede Neural Convolucional (RNC) para classificação do estado de degradação dos rolamentos. O procedimento consistiu em duas etapas. Na etapa não supervisionada, descritores dos sinais no domínio do tempo são extraídos, e utilizados como entrada de um algoritmo de clusterização *k-Means*, onde as classes são constituídas. Na etapa supervisionada os dados categorizados são fornecidos como entrada para a RNC. A acurácia obtida no treino e teste foram, respectivamente, 98.89% e 98.58%.

### 3 | REFERENCIAL TEÓRICO

Embora a maioria dos trabalhos recentes abordando o tema do diagnóstico de falhas em sistemas industriais utilizem métodos baseados em *Deep Learning*, os algoritmos de *Machine Learning* convencionais ainda são utilizados para essa finalidade. A seguir é apresentada uma breve descrição dos algoritmos *Support Vector Machine*, *K-Nearest Neighbour*, *Decision Tree* e *Random Forest*, aplicados para o treinamento dos modelos.

#### 3.1 Support Vector Machine – SVM

*Support Vector Machine* são algoritmos de classificação supervisionada, lineares e binários, que procuram o hiperplano de separação entre as classes, de maneira a maximizar a distância entre as amostras mais próximas (CORTES e VAPNIK, 1995).

A aplicação do *SVM* a problemas não lineares pode ser possível com a utilização de funções *kernel*, que projetam o espaço amostral sobre espaços de maior dimensão onde os dados são linearmente separáveis. Exemplos de funções *kernel* que podem ser utilizadas são, quadrática, gaussiana, polinomial. Embora seja, em sua forma convencional, um algoritmo binário, que suporta apenas problemas com duas classes, a utilização de métodos multi-classe torna o *SVM* aplicável a problemas com mais de duas classes.

#### 3.2 k-Nearest Neighbour - k-NN

Classificadores implementados com base no algoritmo *k-NN* classificam amostras desconhecidas com base na distância entre essas e as amostras atribuídas às classes

envolvidas no problema (DUDA et al., 2001). Por ser de fácil implementação, esses classificadores são amplamente utilizados em problemas de classificação.

Para sua implementação devem ser definidos, o número de vizinhos ( $k$ ), a métrica para o cálculo da distância entre as amostras e a regra de decisão para atribuição de uma classe a uma amostra desconhecida. Uma regra de decisão comumente utilizada é atribuir à amostra desconhecida a classe da maioria das  $k$  amostras mais próximas.

### 3.3 Decision Tree – DT

A *DT* é um método de classificação que utiliza a estratégia dividir-para-conquistar, cujo processo de decisão para atribuição de uma classe é constituído por múltiplos estágios (WEBB, 2003). Sua estrutura hierárquica em forma de árvore invertida o torna um classificador de simples implementação. As *DT* são constituídas por nós e ramos.

As regras de decisão estão associadas a nós, onde testes são realizados para a definição do percurso ao longo da árvore. Os ramos representam os possíveis caminhos a serem percorridos de acordo com a decisão tomada no nó precedente. Decisões sucessivas são tomadas até que um nó terminal seja alcançado, onde uma classe é atribuída à amostra desconhecida (DOUGHERTY, 2013). A implementação da *DT* requer a definição prévia da profundidade da árvore e do critério de decisão.

### 3.4 Random Forest – RF

A *RF* é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado, que pode ser aplicado a problemas de classificação e regressão. Uma *RF* é constituída por um conjunto de Árvores de Decisão, cujo algoritmo de treinamento mais comumente utilizado é o *bagging*. Como utiliza combinação das árvores de decisão, a Floresta Aleatória, de forma geral, é mais estável e apresenta melhor desempenho quando comparada a outros algoritmos de *Machine Learning*.

A premissa sobre a qual se baseia a *RF* é que, um vetor aleatório  $v_k$  para a  $k$ -ésima árvore, independente dos vetores aleatórios passados  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_{k-1}$ , mas com a mesma distribuição será criado. Com estes vetores aleatórios gerados, em um processo de votação envolvendo as  $k$  árvores, uma classe será atribuída à amostra desconhecida (BREIMAN, 2001).

## 4 | METODOLOGIA

Nessa seção é feita uma descrição detalhada da metodologia que orientou a execução do trabalho. O conjunto de dados utilizado para a realização dos testes é apresentado, bem como os descritores extraídos a partir dos sinais. São descritas as etapas de modelagem e os ajustes dos parâmetros utilizados para a configuração dos classificadores.

## 4.1 Descrição do conjunto de dados

O conjunto de dados de vibração utilizado é um dos mais populares no meio acadêmico para testes com modelos de *Machine Learning* e foi desenvolvido pela *Case Western Reserve University - CWRU*. Para a aquisição dos sinais, um motor com potência nominal de 2 hp foi posto em funcionamento com cargas de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp. Os rolamentos do lado acionado (*DE – Drive End*) e do lado não acionado (*NDE - Non Drive End*) foram danificados artificialmente utilizando eletro-descargas criando erosões com diâmetros de 0,1778 mm a 1,016 mm. Os sinais de vibração foram coletados por acelerômetros nas frequências de amostragem de 12 kHz e 48kHz.

O conjunto de dados original é constituído por seis classes, cujas amostras foram colhidas do rolamento *DE*. Além da condição de funcionamento normal (*HDE*), foram simulados três tipos de falhas: na pista interna (*IR*), nas esferas (*BA*) e na pista externa em três posições diferentes, centralizada (*ORCENT*), ortogonal (*ORORT*) e oposta (*OROPP*). Para os testes foram utilizadas somente as falhas de diâmetro 0,1778 mm, em todas as potências às quais o motor foi submetido. Os sinais originais de vibração colhidos a partir da simulação das falhas, foram particionados em segmentos de 2000 pontos que constituíram as amostras que foram reunidas nas respectivas classes. A coluna 3 da Tabela 1 apresenta as quantidades de amostras e atributos para cada classe para cada potência do motor.

## 4.2 Extração de descritores

Os modelos de classificação foram treinados utilizando descritores estatísticos cuja representação matemática está mostrada nas equações de (1) a (5). Alguns trabalhos apresentados na Seção 2, confirmam o bom desempenho desses descritores para a representação de sinais de vibração e sua adequação ao problema de detecção de falhas em rolamentos.

$$\text{Média } (\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i) \quad (1)$$

$$\text{Variância } (\sigma^2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - \mu)^2 \quad (2)$$

$$\text{Assimetria} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x(i) - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (3)$$

$$\text{Curtose} = \frac{1}{N} \left( \frac{x(i) - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (4)$$

$$\text{Fator de Crista} = \frac{\max(|x|)}{RMS} \quad (5)$$

Nas equações de (1) a (5), a variável  $x(i)$  representa a  $i$ -ésima amostra do conjunto de dados. A coluna 4 da Tabela 1 apresenta as dimensões das matrizes de descritores estatísticos por classe, após a aplicação das equações (1) a (5). Após a extração dos descritores estatísticos, as matrizes das classes foram concatenadas formando matrizes

de 420 x 5 para a potência de 0hp, e 540x5 para as demais potências.

Potência	Classe	Matriz de Atributos	
		Original	Estatístico
0hp	HDE	120 x 2000	120 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
1hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
2hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
3hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5

Tabela 1 - Dimensões das matrizes por classe e por potência com os sinais originais segmentados (coluna 3), e após extração de descritores estatísticos (coluna 4)

### 4.3 Análise do espaço amostral do conjunto de descritores obtidos a partir dos parâmetros estatísticos

A obtenção de modelos com boa capacidade de separação das classes, além do bom desempenho dos algoritmos, depende da extração de descritores que, de fato, permitam uma boa representação do espaço amostral.

A Figura 1 ilustra o espaço amostral representado pelos descritores estatísticos *média x variância*, para potências da carga de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp. Como pode ser observado, a utilização desses descritores para a representação dos sinais de vibração,

permite uma boa separabilidade das classes, o que favorece a obtenção de classificadores com boa capacidade de predição.

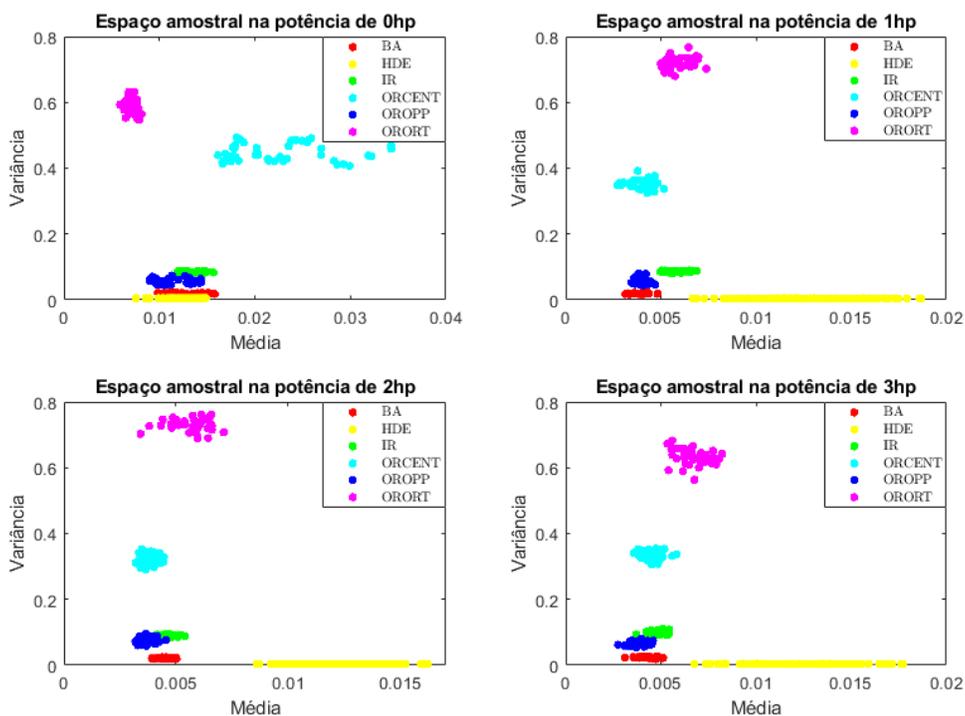


Figura 1 - Espaços amostrais com atributos estatísticos para potências de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp

#### 4.4 Treinamento e Validação dos modelos

Os modelos de classificação foram treinados com os algoritmos *k-NN*, *SVM*, *DT* e *RF*. Os critérios de divisão utilizados para implementação dos classificadores *DT* foram o *gini index* e o *cross entropy*, sendo em todos os casos utilizadas árvores com profundidade 10. No algoritmo *k-NN* foi utilizada a métrica de distância euclidiana e variados os números de vizinhos em 1, 3 e 5. No classificador *SVM* foram testados os *kernels linear*, *gaussian* e *polynomial*. Para os classificadores implementados com a *RF*, os modelos foram treinados com 5, 10, 15 e 20 árvores. O conjunto de dados foi dividido entre treino, com 70% das amostras, e teste com os 30% restantes. O desempenho dos modelos foi avaliado pelo método *k-Fold Cross Validation* com  $k=10$ , e foi utilizada a métrica de acurácia. Todos os testes foram realizados utilizando o Matlab®, versão R2018b.

## 5 | RESULTADOS

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos pelos classificadores *DT*, *k-NN*, *SVM* e *RF*. Como pode ser observado, de forma geral, todos os modelos obtiveram bom desempenho nas etapas de treinamento e teste, atingindo valores de acurácia de 100%, ou próximos desse valor.

Analisando os resultados obtidos utilizando *DT* (Tabela 2), é possível verificar que a regra de divisão utilizando *cross entropy* foi ligeiramente superior ao método utilizando *gini index*. Para o classificador *k-NN* (Tabela 3), em todas as configurações utilizadas para as diferentes cargas de potência do motor, foi possível obter acurácia acima de 91,30% sendo que o melhor resultado foi obtido utilizando o valor de  $k = 3$ , o qual obteve uma acurácia de 100% nas etapas de treinamento e testes. O classificador *SVM* (Tabela 3), de forma geral, obteve os melhores resultados utilizando o *kernel* do tipo *polynomial*, no qual em todas as configurações obteve acurácia em 100% nas etapas de treinamento e testes. Os modelos de classificação implementados utilizando o algoritmo *RF* (Tabela 4) obtiveram desempenhos acima de 98,40% de acurácia, sendo que, a partir de uma coleção igual ou superior a dez árvores, em todas as configurações foi possível obter taxas de acerto de 100% nas etapas de treinamento e testes para os diferentes tipos de cargas do motor.

Conforme visto anteriormente na Figura 1, os descritores baseados em parâmetros estatísticos apresentam boa separabilidade interclasses e baixa dispersão dos dados intraclases. A compatibilidade entre os resultados obtidos nas fases de treino e teste, é um indicativo de que os modelos não foram afetados pelo problema do *overfitting*, que ocorre quando o modelo se especializa nos dados de treino e apresenta desempenho ruim na fase de teste.

Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]		Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste			Treino	Teste
0	Entropy	100,00	100,00	2	Entropy	100,00	100,00
	Gini	100,00	100,00		Gini	100,00	100,00
1	Entropy	99,74	100,00	3	Entropy	100,00	100,00
	Gini	99,74	99,42		Gini	100,00	100,00

Tabela 2 - Resultado com Classificador DT

Potência [hp]	k-NN			SVM		
	Parâmetro	Acurácia [%]		Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste		Treino	Teste
0	k = 1	92,18	91,30	Guassian	93,20	92,90
	k = 2	92,52	93,70	Linear	86,05	86,50
	k = 3	93,54	92,10	Polinomial	98,98	100,00
1	k = 1	100,00	100,00	Guassian	100,00	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	99,74	100,00
	k = 3	100,00	100,00	Polinomial	100,00	100,00
2	k = 1	100,00	100,00	Guassian	100,00	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	99,74	100,00
	k = 3	100,00	100,00	Polinomial	100,00	100,00
3	k = 1	99,74	100,00	Guassian	99,74	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	97,88	98,80
	k = 3	99,74	99,74	Guassian	99,74	100,00

Tabela 3 – Resultado com os classificadores k-NN e SVM

Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]		Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia	
		Treino	Teste			Treino	Teste
0	5 trees	99,90	100,00	2	5 trees	99,94	100,00
	10trees	99,98	100,00		10 trees	100,00	100,00
	15 trees	99,99	100,00		15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00		20 trees	100,00	100,00
1	5 trees	99,94	99,40	3	5 trees	99,94	100,00
	10 trees	100,00	100,00		10 trees	100,00	100,00
	15 trees	100,00	100,00		15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00		20 trees	100,00	100,00

Tabela 4 – Resultado com Classificador RF

## 6 I CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a utilização de parâmetros estatísticos para a extração de descritores de sinais de vibração obtidos a partir de um simulador de equipamentos dinâmicos, o qual pode simular condições reais de falhas em rolamentos de motores elétricos industriais. Diferentes naturezas de operação, tais como, condição de funcionamento normal (sem falha) e diversos tipos de falhas em rolamentos, de ocorrência comum em equipamentos rotativos utilizados em instalações industriais, foram simuladas. Os resultados experimentais obtidos com os descritores baseados em parâmetros estatísticos, e com a utilização dos algoritmos de classificação *Decision Tree (DT)*, *k-Nearest Neighbor*

(*k*-NN), *Support Vector Machine* (SVM) e *Random Forest* (RF), indicam a viabilidade da implementação de sistemas de diagnóstico de falhas com boa capacidade de classificação. Os classificadores com pior desempenho tiveram acurácia acima de 90%, e várias configurações de classificação tiveram 100% de acerto na fase de teste. Os melhores resultados foram obtidos com o classificador *DT*, utilizando *entropy* como regra de decisão, e com o classificador *RF* com uma coleção de dez árvores. O bom resultado apresentado com os descritores baseados em dados estatísticos comprova a boa separabilidade dos dados, o que facilita o desempenho dos algoritmos de classificação utilizados. Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que a utilização de descritores extraídos a partir de parâmetros estatísticos no domínio do tempo, juntamente com algoritmos de *Machine Learning* eficientes podem resultar em sistemas de diagnósticos de falhas precisos e confiáveis para o monitoramento de equipamentos dinâmicos em instalações industriais.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, P. e JAYASWAL, P. (2019). **Diagnosis and classifications of bearing faults using artificial neural network and support vector machine**. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1–12. doi:10.1007/s40032-019-00519-9.
- BREIMAN, L. (2001). **Random forests**. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- CHEN, Z., GRYLLIAS, K., e LI, W. (2019). **Mechanical fault diagnosis using Convolutional Neural Networks and Extreme Learning Machine**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133, 106272. doi:10.1016/j.ymssp.2019.106272.
- CORTES, C. e VAPNIK, V. (1995). **Support-vector networks**. In *Machine Learning*, 273–297.
- DEY, S., ROY, S.S., SAMANTA, K., MODAK, S., e CHATTER-JEE, S. (2019). **Autocorrelation based feature extraction for bearing fault detection in induction motors**. In *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 1–5.
- DOUGHERTY, G. (2013). **Pattern Recognition and Classification: An Introduction**. Springer Publishing Company, Incorporated.
- DUDA, R.O., HART, P.E., e STORK, D.G. (2001). **Pattern Classification**. Wiley, New York, 2 edition.
- NAYANA, B.R. e GEETHANJALI, P. (2017). **Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal**. *IEEE Sensors Journal*, 17(17), 5618–5625.
- RAUBER, T.W., e VAREJAO, F.M. (2015). **Heterogeneous feature models and feature selection applied to bearing fault diagnosis**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1), 637–646.
- TAHIR, M.M., KHAN, A.Q., IQBAL, N., HUSSAIN, A., e BADSHAH, S. (2017). **Enhancing fault classification accuracy of ball bearing using central tendency based time domain features**. *IEEE Access*, 5, 72–83.

TOMA, R., PROSVIRIN, A., e KIM, J. (2020). **Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers.** Sensors. doi:10.3390/s20071884.

WEBB, A. (2003). **Statistical Pattern Recognition.** Wiley Inter Science electronic collection. Wiley.

ZHANG, R., PENG, Z., WU, L., YAO, B., e GUAN, Y. (2017). **Fault diagnosis from raw sensor data using deep neural networks considering temporal coherence.** Sensors, 17,549. doi:10.3390/s17030549.

ZHANG, S., ZHANG, S., WANG, B., e HABETLER, T.G. (2019). **Machine learning and deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review.** CoRR, abs/1901.08247.

ZHOU, Q., SHEN, H., ZHAO, J., LIU, X., e XIONG, X. (2019). **Degradation state recognition of rolling bearing based on k-means and cnn algorithm.** Shock and Vibration, 2019, 1–9. doi:10.1155/2019/8471732.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**JOÃO DALLAMUTA** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

## 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](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)