

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

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

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

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

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Gírlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

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

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

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

### **Linguística, Letras e Artes**

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

### **Conselho Técnico Científico**

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

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

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



## Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

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

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

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

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

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

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

contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

## **APRESENTAÇÃO**

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

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

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

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

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

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

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

### **CAPÍTULO 2..... 13**

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

Pedro Henrique Camargos  
Ricardo Elias Caetano  
Marcel Fernando da Costa Parentoni

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

### **CAPÍTULO 3..... 25**

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

Rogério Martins de Souza

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

### **CAPÍTULO 4..... 39**

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

Manuel Arturo Rendón Maldonado  
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

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

### **CAPÍTULO 5..... 54**

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

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

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

### **CAPÍTULO 6..... 71**

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

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento  
Lilian de Fátima Costa Santos

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

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

**CAPÍTULO 7..... 83**

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

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

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

**CAPÍTULO 8..... 97**

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

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

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

**CAPÍTULO 9..... 112**

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

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

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

**CAPÍTULO 10..... 126**

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

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

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

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

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

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

**CAPÍTULO 17.....224**

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

Luciano de Oliveira Daniel  
Sergio Luis Varricchio

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

**CAPÍTULO 18.....240**

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

Sergio Luis Varricchio  
Cristiano de Oliveira Costa

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

**CAPÍTULO 19.....256**

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

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

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

**CAPÍTULO 20.....264**

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

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

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

**CAPÍTULO 21.....277**

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

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

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

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



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

*Data de aceite: 04/02/2021*

### **Pedro Henrique Camargos**

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia  
Grupo de Veículos Elétricos  
Universidade Federal de Itajubá  
Itajubá – MG  
<http://lattes.cnpq.br/3321340146708240>

### **Ricardo Elias Caetano**

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia  
Grupo de Veículos Elétricos  
Universidade Federal de Itajubá  
Itajubá - MG  
<http://lattes.cnpq.br/6100133376047544>

### **Marcel Fernando da Costa Parentoni**

Instituto de Sistemas Elétricos e Energia  
Universidade Federal de Itajubá  
Itajubá - MG  
<http://lattes.cnpq.br/3155765503130820>

**RESUMO:** Escolher o tipo de motor elétrico de tração em sistemas de propulsão de veículos elétricos leves não é uma tarefa trivial. As características técnicas e econômicas devem ser consideradas pelos fabricantes, que devem optar por um dos quatro tipos de motores elétricos: motor de indução, motor de corrente contínua, motor de relutância variável e motor de ímãs permanentes. Foi realizado um estudo comparativo qualitativo e quantitativo entre estes tipos de máquinas com o objetivo de analisar a viabilidade técnica da utilização do motor de indução em sistemas de propulsão de veículos elétricos leves. Em

ambas as análises, critérios como densidade de potência, maturidade tecnológica, confiabilidade e custo foram analisados. Concluiu-se que o motor de indução foi classificado como sendo a máquina elétrica com maior confiabilidade e menor custo de operação quando aplicada a veículos elétricos leves.

**PALAVRAS - CHAVE:** Densidade de potência, estudo comparativo, motor de indução, viabilidade técnica, veículo elétrico leve.

### COMPARATIVE STUDY OF TECHNICAL FEASIBILITY OF THE USE OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS IN LIGHT ELECTRIC VEHICLES

**ABSTRACT:** Choosing the type of electric traction motor in light electric vehicle propulsion systems is not a trivial task. The technical and economic characteristics must be considered by the manufacturers, who must choose one of the four types of electric motors: induction motor, direct current motor, switched reluctance motor, and permanent magnet motor. A comparative qualitative and quantitative study was carried out between these types of machines in order to analyze the technical feasibility of using the induction motor in propulsion systems for light electric vehicles. In both analyzes, criteria such as power density, technological maturity, reliability, and cost were analyzed. It was concluded that the induction motor was classified as the electrical machine with the highest reliability and lowest operating cost when applied to light electric vehicles.

**KEYWORDS:** Power density, comparative study, induction motor, technical feasibility, electric

vehicles.

## INTRODUÇÃO

A primeira grande conferência mundial, “Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente Humano,” que tratava de assuntos relacionados ao meio ambiente foi realizada em 1972. Em 1997, o Protocolo de Kyoto foi assinado, fornecendo orientações as nações sobre como reduzir a emissão de gases poluentes responsáveis pelo aquecimento global. Energia é uma necessidade em um mundo moderno, mas energia baseada em combustíveis fósseis sistema está poluindo o meio ambiente (COLDENAR-SANTOS, 2019). Entre todos os setores que consomem combustíveis fósseis, o setor de transportes é responsável pelo consumo de 55,9 % de todo o petróleo utilizado no mundo, segundo Mattos (2001). Portanto, para minimizar os efeitos do aquecimento global é necessário desenvolver meios de transportes que não prejudiquem o meio ambiente. Em outras palavras, investir na construção e utilização dos veículos elétricos (VEs).

Os primeiros VEs foram construídos no final do século XIX. De 1894, ano em que o primeiro veículo elétrico foi comercializado, até 1960, os automóveis movidos a combustão interna dominaram o mercado. A partir da segunda metade do século XX, os VEs ganharam viabilidade técnica e econômica. Para que este automóvel opere com alto desempenho é necessário escolher adequadamente o tipo de motor elétrico de tração utilizado em seu sistema de propulsão.

Os principais tipos de motores elétricos usados em sistemas de propulsão elétrica são: motor em corrente contínua (MCC), motor de indução (MI), motor de relutância variável (MRV) e o motor síncrono de ímãs permanentes (MSIP). O MSIP é classificado como motor de corrente contínua sem escovas (BLDC) ou motor em corrente alternada sem escovas (BLAC). O BLAC também é chamado de motor síncrono de ímãs permanentes (MSIP).

Chan (1993), Chan e Chau (1997), Chan (2002) e Chau, Chan e Liu (2008) são alguns dos inúmeros autores que fizeram estudos comparativos dos tipos de motores elétricos de tração usados em sistemas de propulsão elétrica dos VEs. A tecnologia dos MCCs dominou o mercado até a segunda metade do século XX. Bazzi (2013) afirma que a queda na utilização do MCC é devido a sua baixa eficiência. A crescente redução dos custos com materiais magnéticos proporcionou a ascensão do MSIP. Com a invenção dos conversores de estado sólido, o MI passou a ganhar espaço no mercado de motores de tração elétrica a partir da década de 90. Para verificar a viabilidade técnica da utilização dos MIs nos VEs, foram realizadas análises na tentativa de averiguar teoricamente as vantagens e desvantagens do emprego da máquina assíncrona.

## METODOLOGIA

O MI foi comparado com o MCC, MSIP e MRV por meio de um estudo comparativo quantitativo e qualitativo considerando os seguintes critérios: densidade de potência, maturidade tecnológica, confiabilidade e eficiência. Gascón et al. (2003) e Xu et al. (2009), descrevem as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de motores de tração elétrica. Para validar e compreender o que foi proposto por estes autores, é necessário descrever cada um dos critérios.

A densidade de potência é a quantidade de potência gerada por unidade de massa. Perdas por efeito joule, perdas por atrito e ventilação tendem a diminuir esta taxa de potência/peso. Máquinas com altas densidades de potência operam com altos rendimentos. Quanto menores as perdas no motor, maior será seu rendimento. Para avaliar qual tipo de máquina possui em média maiores rendimentos, deve-se levar em consideração suas características construtivas. Máquinas que apresentam rotores sem enrolamentos possuem menores perdas por efeito joule, conseqüentemente são mais eficientes que as máquinas com rotor bobinado.

A confiabilidade é a capacidade de um sistema de manter-se em funcionamento em circunstâncias normais e em situações inesperadas e hostis. No caso das máquinas elétricas, este parâmetro mensura o quanto o motor é capaz de tolerar perturbações dinâmicas. Motores robustos, com altas tolerância a faltas (curto-circuitos), sobreaquecimento e sobrecargas possuem maior confiabilidade.

A maturidade tecnológica identifica o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia. O *Technology Readiness Level* (TRL) é uma métrica desenvolvida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) que classifica uma tecnologia em nove níveis. Dentre os tipos de motores de tração empregados em sistemas de propulsão elétrica de veículos elétricos, existem aqueles que se tornaram opções viáveis técnica e economicamente apenas na segunda metade do século XX, enquadrando-se nos últimos níveis segundo a TRL. Motores com elevada maturidade tecnológica em geral possuem uma tecnologia já consolidada no mercado e são mais baratos.

## MI E MCC

Em 1886, Werner Siemens inventou a primeira máquina de corrente contínua auto induzida. Nikola Tesla construiu em 1887, o primeiro protótipo do MI. Apesar de ambas as máquinas terem sido inventadas na mesma década, o MCC predominou como a escolha mais adequada em aplicações que envolviam tração elétrica até a segunda metade do século XX.

Os sistemas de acionamento dos MCCs possuem conversores simplificados e técnicas de controle fáceis de serem implementadas, sendo sistemas mais simples quando comparados aos sistemas da máquina assíncrona. Apesar desta vantagem operativa, o

MCC apresenta um rendimento relativamente inferior ao MI, pois sua velocidade máxima é limitada pelo faiscamento e pelas forças centrífugas.

O fato da máquina de corrente contínua e da máquina assíncrona terem sido inventadas a mais de um século, garantiram-lhes maturidade tecnológica. Porém, a partir da segunda metade do século XX, com a invenção dos inversores de frequência, os MCCs passaram a ser substituídos gradativamente pelos MIs.

Os MCCs apresentam desgastes nas escovas e no comutador, gerando faíscas que danificam o isolamento da máquina. Consequentemente, exigem manutenções periódicas para a troca das escovas e a limpeza do comutador de lâminas. Comparado ao MCC, os MIs, por não possuírem sistemas de comutação, apresentam melhores rendimentos e menores custos com manutenção.

As máquinas de corrente contínua apresentam baixa densidade de potência quando comparadas às máquinas de indução, devido as perdas adicionais proporcionadas pelo seu sistema de comutação mecânica. Para uma mesma faixa de potência, geralmente são motores mais pesados e volumosos que os MIs, além de possuírem um elevado momento de inércia.

## MI E MRV

A locomotiva *Glasgow Edinburgh* foi o primeiro veículo a utilizar os MRVs, sendo construídos entre os anos de 1837 e 1840. Porém, as máquinas de relutância variável ficaram esquecidas pelos fabricantes de veículos elétricos por mais de 100 anos. Somente a partir da segunda metade do século XX, que os MRVs ganharam viabilidade técnica devido à invenção dos inversores e controladores eletrônicos.

Os MRVs possuem formas construtivas simples com alta taxa de confiabilidade. Suas perdas estão concentradas no estator, tornando-se uma vantagem construtiva em relação aos MIs, principalmente sobre a motor de rotor bobinado. Tanto o MI quanto o MRV são máquinas robustas (DIAO *et al.*, 2020). A ausência de bobinas na parte girante garante ao MRV uma excelente tolerância aos efeitos nocivos dos curtos-circuitos.

Máquinas que possuem ímãs permanentes em sua estrutura apresentam dificuldades no controle de enfraquecimento de campo, limitando a sua região de potência constante. Por não serem construídos com ímãs, os MRVs possuem uma elevada razão de velocidade.

As regiões de alta eficiência do MI, MRV e MSIP são mostradas no gráfico da figura 1. As máquinas de relutância variável são altamente eficientes em regiões próximas a velocidade máxima do veículo. De acordo com Gascón *et al.* (2003), o MRV consegue estender sua zona de enfraquecimento de campo, atingindo um bom desempenho com velocidades de 3 a 4 vezes acima da velocidade nominal.

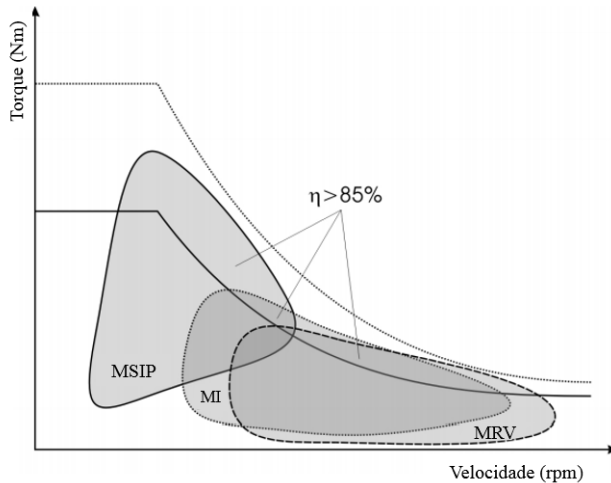


Figura 1 – Regiões de operação.

Fonte: Finken, Felden e Hameyer (2008).

O torque pulsante, o ruído e a vibração no interior da máquina de relutância variável a torna menos atrativa. Yang *et al.* (2015) em seu estudo comparou experimentalmente o MRV, MSIP e o MI. Os autores constataram que as amplitudes das forças radiais nas máquinas de ímãs permanentes e de indução são atenuadas nos pontos de operação dentro da região de enfraquecimento de campo. O mesmo não ocorre com o MRV, cujos componentes harmônicos responsáveis pela vibração e ruído são infinitamente mais pronunciados na região de potência constante (SUN, *et al* 2018).

## MI E MSIP

O primeiro MI com rotor de gaiola foi desenvolvido pelo engenheiro eletricitista russo *Michael von Dolivo Dobrowolsky* na Alemanha em 1889. Dois anos depois, iniciou-se a fabricação em série dos MIs nas potências de 0,4 a 7,5 kW. A figura 2, mostra a evolução da relação peso/potência nos MIs. Durante mais de um século, inúmeras pesquisas em engenharia de materiais, proporcionaram a estas máquinas uma redução em sua relação peso/potência ou aumento da densidade de potência.

No ano de 1856, o eletrotécnico *Werner Siemens* construiu um gerador auto-induzido cuja excitação era proveniente dos ímãs permanentes. Ele foi um dos pioneiros na construção das máquinas de ímãs permanentes. Porém, diferente de *Dobrowolsky*, *Siemens* não obteve sucesso, devido à ação restrita dos ímãs que possuíam baixos valores de produto energético máximo. Foi somente a partir dos anos 50 que os MSIPs vieram a ganhar expressividade técnica e econômica, sendo fabricados com ímãs de elevado

produto energético e maior força coercitiva.

A evolução dos materiais magnéticos, conforme mostrado na figura 3, proporcionou o desenvolvimento de MSIP com altas densidades de potência. A maturidade tecnológica do MI e do MSIP possibilitaram as suas construções com altas densidades de potência. Esta é uma característica de desempenho essencial de um motor de tração de um veículo elétrico.

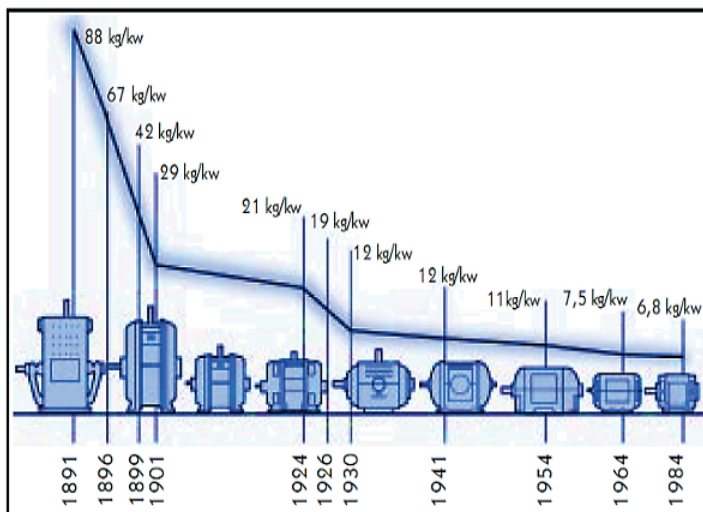


Figura 2 - Evolução dos motores de indução.

Fonte: Sens (2001).

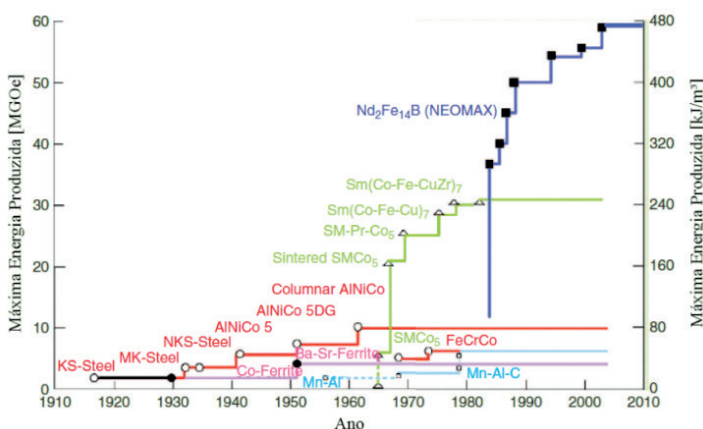


Figura 3 - Evolução dos materiais magnéticos.

Fonte: Rahman (2013).

As máquinas de ímãs permanentes não possuem enrolamentos em seu rotor, o que contribui para diminuir as perdas no cobre. O MI em gaiola é projetado e construído com o objetivo de diminuir ao máximo as resistências das barras do rotor, segundo Dorrel et al. (2010), reduzindo as perdas ôhmicas e conseqüentemente, o seu escorregamento.

Em termos de confiabilidade e segurança operativa os MSIPs apresentam algumas desvantagens em relação a máquina assíncrona. Os ímãs podem ser desmagnetizados quando submetidos a altas temperaturas e quando são expostos a aumentos sucessivos das forças centrífugas, há uma grande probabilidade de danificarem-se (SUN *et al.*,2019). Os MIs, entretanto, são máquinas robustas e projetadas para operarem em ambientes hostis (PREM KUMAR.,*et al.*,2019; LUCENA-JUNIOR, *et al*, 2020; CHEN; SEVERSON 2019).

Goss, Popescu e Staton (2013) e Sharifan et al. (2015) compararam o desempenho dos MSIPs e MIs em aplicações que envolviam tração elétrica. Os resultados obtidos demonstraram maiores perdas no MI.

O mapa de eficiência do motor de indução apresenta elevados rendimentos em regiões de altas velocidades. No MSIP, a região de alta eficiência encontra-se próxima a velocidade nominal da máquina. Em velocidades elevadas, o rendimento deste motor diminui devido ao aumento da componente longitudinal da corrente do estator (aumento das perdas joule), em consequência da criação de um campo magnético de reação que se opõe ao campo magnético produzido pelo rotor.

De acordo com Qin et al. (2018), os ímãs de neodímio ferro boro custavam em média US \$250/kg no ano de 2005. Em 2012, ímãs construídos com este mesmo material custavam em torno US \$427/kg. O alto custo e a volatilidade nos preços destes materiais conferem desvantagem ao MSIP quando comparado ao MI. No estudo realizado por Goss, Popescu e Staton (2013), o preço de aquisição do MSIP foi de 2 a 3 vezes maior que o do MI para a mesma potência.

## COMPARAÇÃO QUANTITATIVA

Gascón *et al.* (2003) e Xu *et al.* (2009) avaliaram quantitativamente os tipos de motores de tração usados nos sistemas de propulsão elétrica segundo os critérios já mencionados nas tabelas 1 e 2. Em termos de densidade de potência, o MSIP apresentou a maior pontuação nas duas avaliações. Devido as suas características construtivas é possível construir máquinas com menor peso.

Estudos quantitativos com motores elétricos de tração de 40 a 50 kW, Ves leves, e que utilizam conversores eletrônicos foram realizados por West (1994). O autor classificou as máquinas, como mostra a tabela 3. O MI foi pontuado com o dobro do peso do MSIP, sendo duas vezes mais leve que o MCC.

O MSIP recebeu nota máxima nos estudos de Xu et al. (2009) e Gascón et al. (2003) no critério eficiência. De acordo com a tabela 2, a máquina assíncrona foi a segunda mais

eficiente, recebendo nota 7 em um total de 10. West (1994) também analisou o rendimento médio dos motores, com e sem a presença dos conversores, como mostra a tabela 4. Nestes estudos, o MSIP foi classificado como um motor mais eficiente, seguido do MRV e do MI. O MCC recebeu as menores pontuações devido às altas perdas e alta taxa de manutenção.

Itens	Máximo	BLDC	MSIP	MRV	MI
Densidade de Potência	10	9	10	8	7
Capacidade de Sobrecarga	10	7	7	8	9
Eficiência	10	9	10	8	7
Operação em Altas Velocidades	20	10	16	18	16
Controle	20	15	15	16	16
Baixo Ruído	10	8	8	6	8
Baixa Flutuação de Torque	10	6	8	5	7
Tamanho e Peso*	10	8	9	7	7
Robustez	20	14	14	17	16
Manutenção	10	8	8	9	9
Manufaturabilidade	20	14	12	18	16
Custo**	30	20	18	26	28
<b>Total</b>	<b>180</b>	<b>128</b>	<b>135</b>	<b>146</b>	<b>146</b>

\*Quanto maior a pontuação, maior é o tamanho e peso do motor.

\*\*Quanto maior a pontuação, menor é o custo da máquina.

Tabela 1 - Comparação dos motores elétricos.

Fonte: Adaptada de Gascón et al. (2003).

Características	MCC	MI	MSIP	MRV
Densidade de Potência	5	7	10	7
Eficiência	5	7	10	7
Controle	10	7	8	7
Confiabilidade	5	10	8	10
Maturidade Tecnológica	10	10	8	8
Custo*	8	10	6	7
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>51</b>	<b>50</b>	<b>46</b>

Tabela 2 - Comparação do desempenho dos motores elétricos de tração.

Fonte: Adaptada de Xu et al. (2009).

Base MSIP=100	Peso	
	Motor	Motor e Conversor
MSIP	100	200
MRV	150	250
MI	200	300
MCC	400	450

Tabela 3 - Comparação peso dos motores elétricos.

Fonte: Adaptada de West (1994).



Os MIs e MRVs são máquinas robustas que operam satisfatoriamente em sobrecarga. Capacidade de sobrecarga e robustez são critérios avaliativos relacionados a confiabilidade do motor. Segundo Gascón et al. (2003), as máquinas assíncronas e de relutância variável foram avaliadas com as melhores pontuações nestes dois critérios. Xu et al. (2009) complementou o estudo de Gascón et al. (2003) e concluiu que o MI e o MRV são os tipos de motores mais confiáveis.

	Eficiência [%]		
	Motor	Conversor	Motor e Conversor
MSIP	97	93	90
MRV	94	90	85
MI	90	93	84
MCC	80	98	78

Tabela 4 - Comparação eficiência dos motores elétricos.

Fonte: Adaptada de West (1994).

Xue, Cheng e Cheung (2008) compararam os quatro tipos de acionamentos de motores elétricos considerando os critérios: eficiência, custo e peso. Os resultados são mostrados na tabela 5. No critério eficiência, a máquina de ímãs permanentes ficou em primeiro lugar, seguida da máquina de relutância variável. O MRV opera com elevados rendimentos em altas velocidades, diferente do MSIP. Na análise realizada por Gascón et al. (2003), o BLDC recebeu a menor nota no critério “operação em altas velocidades”.

	Sistema de Acionamento			
	MCC	MI	BLDC	MRV
Eficiência	2	4	5	4,5
Peso	2	4	4,5	5
Custo	5	4	3	4
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>12,5</b>	<b>13,5</b>

Tabela 5 - Comparação do acionamento nos motores elétricos de tração.

Fonte: Adaptada de Xue, Cheng e Cheung (2008).

No estudo de Xu et al. (2009), tabela 2, o MCC recebeu a nota máxima no critério “maturidade tecnológica”, seguida da máquina assíncrona. A relação entre maturidade e custo é confirmada por West (1994), Xue, Cheng e Cheung (2008), e Xu et al. (2009). Nos estudos de Gascón et al. (2003) e Xu et al. (2009), tabelas 1 e 2 respectivamente, o MI recebeu nota máxima no critério “custos”, sendo classificado como o motor mais barato e com maior nível de maturidade tecnológica.

Efetuando um somatório das notas atribuídas pelos critérios avaliativos, verifica-

se que a máquina assíncrona e a máquina de ímãs permanentes possuem as maiores pontuações. No estudo de Xu et al. (2009), o MI atingiu 85,0 % da pontuação máxima e o MSIP com aproximadamente 83,3 %. As pontuações finais mostram que o MI é uma das opções mais vantajosas, quando se necessita escolher o tipo de motor elétrico de tração para VEs leves.

## CONCLUSÃO

Escolher o motor ideal a ser empregado em sistemas de propulsão elétrica não é uma tarefa trivial. O tipo de veículo e a função a que se destina definem algumas variáveis a serem consideradas nesta escolha. Os resultados obtidos das comparações teóricas comprovaram o porquê de o MI ser um tipo de motor amplamente utilizado pelos fabricantes de veículos elétricos.

O MI é uma máquina robusta, cuja tecnologia já está consolidada. Nas avaliações qualitativa e quantitativa, a máquina assíncrona foi classificada como sendo a máquina mais robusta (alta taxa de confiabilidade) e baixo custo de aquisição e operação. De acordo com os critérios, confiabilidade, custo, maturidade tecnológica o MI é tecnicamente e economicamente mais viável de ser implementado em sistemas de propulsão elétrico de veículos elétricos leves quando comparado ao MRV, MCC e MIP.

## REFERÊNCIAS

BAZZI, A. M. Electric machines and energy storage technologies in evs and hevs for over a century. In: IEEE. **2013 International Electric Machines & Drives Conference**. [S.l.], p. 212–219, 2013.

CHAN, C. An overview of electric vehicle technology. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 81, n. 9, p. 1202–1213, 1993.

CHAN, C. C.; CHAU, K. An overview of power electronics in electric vehicles. **IEEE transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 44, n. 1, p. 3–13, 1997.

CHAN, C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002.

CHAU, K.; CHAN, C. C.; LIU, C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 55, n. 6, p. 2246–2257, 2008.

CHEN, J.; SEVERSON, E. L. Optimal design of the bearingless induction motor for industrial applications. 2019 **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. 2019.

COLDENAR-SANTOS, A. et al. Electric vehicle charging strategy to support renewable energy sources in Europe 2050 low-carbon scenario. **Energy** 183 p 61-74. 2019.

DIAO, K, et al. System-level Robust Design Optimization of a Switched Reluctance Motor Drive System Considering Multiple Driving Cycles. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. Jun 2020.

DORRELL, D. et al. Comparison of permanent magnet drive motor with a cage induction motor design for a hybrid electric vehicle. In: IEEE. **The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-**. [S.l.], p. 1807–1813 2010.

FINKEN, T.; FELDEN, M.; HAMEYER, K. Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles. In: IEEE. **2008 18th International Conference on Electrical Machines**. [S.l.], p. 1–5. 2008.

GASCÓN, P. A. et al. Switched reluctance drives for electric vehicle applications. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, n. 1, p. 373–1, 2003.

GOSS, J.; POPESCU, M.; STATON, D. A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. In: IEEE. **2013 International Electric Machines & Drives Conference**. [S.l.], p. 220–225. 2013.

LUCENA-JUNIOR, J. A., et al. Chaos theory using density of maxima applied to the diagnosis of three-phase induction motor bearings failure by sound analysis. **Computers in Industry**, Elsevier, v 123. 2020.

MATTOS, L. B. R. de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa: O caso do Município do Rio de Janeiro**. 222 p. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

PREM KUMAR K., et al. Fuzzy anti-windup PID controlled induction motor **Int J Eng Adv Technol**, 9 (1), 184-189. 2019.

QIN, Y. et al. Vibration mitigation for in-wheel switched reluctance motor driven electric vehicle with dynamic vibration absorbing structures. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 419, p. 249–267, 2018.

RAHMAN, M. A. History of interior permanent magnet motors [history]. **IEEE Industry Applications Magazine**, IEEE, v. 19, n. 1, p. 10–15, 2012.

SENS, M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. **Revista WEG**, v. 1, n. 1, p. 11–13, 2001.

SHARIFAN, S. et al. Performance comparison between brushless pm and induction motors for hybrid electric vehicle applications. In: IEEE. **2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)**. [S.l.], 2015. p. 719–724. 2015.

SUN, W. et al. Vibration effect and control of in-wheel switched reluctance motor for electric vehicle. **Journal of Sound and Vibration**, Elsevier, v. 338, p. 105–120, 2015.

SUN, X. et al. Direct torque control based on a fast modeling method for a segmented-rotor switched reluctance motor in HEV application. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**. 2019.

SUN, X., et al. Core losses analysis of a novel 16/10 segmented rotor switched reluctance BSG motor for HEVs using nonlinear lumped parameter equivalent circuit model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(2), 747-757. 2018.

WEST, J. G. Dc, induction, reluctance and pm motors for electric vehicles. *Power Engineering Journal*, IET, v. 8, n. 2, p. 77–88, 1994.

XU, W. et al. Survey on electrical machines in electrical vehicles. In: IEEE. **2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices**. [S.l.]. p.167–170. 2009

XUE, X.; CHENG, K.; CHEUNG, N. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In: IEEE. **2008 Australasian Universities Power Engineering Conference**. [S.l.]. p. 1–6. 2008.

YANG, Z. et al. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for ev and hev applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, IEEE, v. 1, n. 3, p. 245–254, 2015.

YILMAZ, M. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 52, p. 80–99, 2015.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

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

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

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

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

### C

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

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

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

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

### D

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

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

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

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

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

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

### E

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

Estudo comparativo 13, 15, 275

### I

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

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

### L

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

### M

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

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

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

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

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

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

## **N**

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

## **P**

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

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

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

## **Q**

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

## **R**

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

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

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

## **S**

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

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

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

## **T**

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

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

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

## **V**

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16