

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

## Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. Alexandro 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:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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**

Renan Corrêa de Moura  
Luiz Henrique Leite Rosa  
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>

# CAPÍTULO 1

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

*Data de aceite: 04/02/2021*

*Data de submissão: 04/11/2020*

### **Renan Corrêa de Moura**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP  
<http://lattes.cnpq.br/4894003759786064>

### **Luiz Henrique Leite Rosa**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP  
<http://lattes.cnpq.br/7461610293948635>

### **Carlos Frederico Meschini Almeida**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP  
<http://lattes.cnpq.br/2319455831927610>

### **Nelson Kagan**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo - SP  
<http://lattes.cnpq.br/4099429752287231>

### **Alexandre Dominice**

EDP Brasil  
São Paulo - SP  
<http://lattes.cnpq.br/9971995503744198>

**RESUMO:** Os medidores inteligentes de energia elétrica ou Smart Meters cumprem papel fundamental para o desempenho das Redes Elétricas Inteligentes, apresentando funcionalidades essenciais não somente para

a área de medição e faturamento, mas também para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, sistema de prevenção de fraude, segurança dos dados registrados, automação da distribuição, entre outras funções. Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia para testes e classificação de medidores inteligentes segundo suas funcionalidades, objetivando auxiliar as concessionárias no processo de avaliação e comparação dos medidores inteligentes quanto aos requisitos técnico/funcionais para implementação das Smart Grids. Nessa análise são avaliadas as funcionalidades referentes à qualidade do fornecimento da energia elétrica, sistema de detecção de fraude, alarmes de segurança de operação e configuração do medidor inteligente através de testes realizados no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes do NAPREI/USP. Além disso, apresenta-se a infraestrutura e a integração do sistema de medição com as principais aplicações das Smart Grids que visam aumentar a eficiência da concessionária de energia elétrica.

**PALAVRAS - CHAVE:** Medidores Inteligentes; Qualidade de energia; Detecção de fraudes; Smart Grid; AMI.

### METHODOLOGY FOR SMART METERS TESTING AND CLASSIFICATION AIMING SMART GRIDS APPLICATIONS

**ABSTRACT:** Smart Meters play a key role in the performance of Smart Grids, exhibiting essential features not only for display and billing, but also for power quality monitoring, fraud detection system, recorded data security, distribution automation, among other functions. This paper

presents a methodology for Smart Meters testing e classification according its functionalities, aiming to assist power utilities at smart meter evaluation and comparison process regarding the technical / functional requirements for Smart Grids implementation. In this analysis, features related to power supply quality, fraud detection system, operational safety alarms and smart meter configuration are evaluated through tests performed at the NAPREI / USP Smart Grid Laboratory. In addition, this paper presents the infrastructure and the integration of the metering system with the main applications of Smart Grids that aim to increase the power utility efficiency.

**KEYWORDS:** Smart Meter; Power Quality; Fraud Detection; Smart Grid; AMI.

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo o Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), o termo Smart Grid define uma rede elétrica que utiliza recursos de comunicação, controle, integração de fontes de energia, modelos de geração e adaptação dinâmica aos requisitos dos agentes reguladores do setor de energia.

O funcionamento de uma Smart Grid consiste no fluxo bidirecional de energia e comunicação que ocorre entre geração, transmissão, distribuição e cliente (BHATT, SHAH e JANI, 2014) e (CECATI, 2010). A Tabela 1 apresenta a comparação entre uma rede inteligente e uma rede convencional.

<b>Rede Convencional</b>	<b>Smart Grid</b>
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Sensores
Monitoramento manual	Auto monitoramento
Restauração manual	Autocorreção
Falhas e apagões	Adaptativos e ilhados
Controle limitado	Controle adaptativos
Poucas opções para os clientes	Muitas opções de para os clientes

Tabela 1. Comparação entre Smart Grid e rede convencional

As principais aplicações que envolvem uma Smart Grid estão apresentadas na Fig. 1 (ESCOBEDO, JACOME e ARROYO-FIGUEROA, 2016).

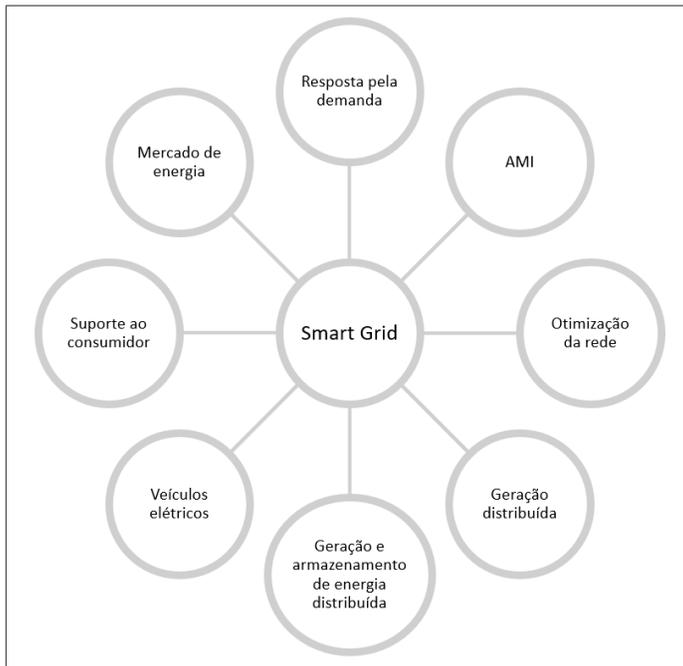


Fig. 1 Aplicações da Smart Grid.

Cada aplicação apresentada na figura pode ser descrita como:

- Infraestrutura avançada de medição (AMI): Leitura remota dos medidores, conexão/ desconexão remota, detecção de furto, pré-pagamento da fatura, gerenciamento da força de trabalho móvel;
- Resposta pela demanda: manutenção avançada da demanda nos horários de pico, previsão e mudança de carga;
- Otimização da rede: Gerenciamento de falta de energia, controle de chaves, controle dinâmico da tensão, integração com dados meteorológicos e controle de banco de capacitores;
- Geração e armazenamento de energia distribuída: monitoramento dos ativos distribuídos;
- Veículos elétricos: identificação de instalação de ponto de carregamento;
- Suporte ao consumidor: Aplicação do fluxo de dado para gerenciamento de energia elétrica do usuário final;

- Mercado de energia: tarifa dinâmica.

Nas redes elétricas inteligentes, uma das aplicações mais importantes é a AMI (do inglês, Advanced Metering Infrastructure), utilizada para medir, coletar e analisar dados de consumo de energia e qualidade, tanto de produto como de serviço, de cada consumidor. A comunicação utilizada na aplicação AMI é bidirecional, permitindo à concessionária a realização de melhoria na operação, aumento da eficiência da manutenção da rede elétrica, gerenciamento da demanda e aumento na capacidade de planejamento de expansão da rede elétrica (KABALCI, 2016). Uma estrutura típica de AMI é apresentada na Fig. 2.

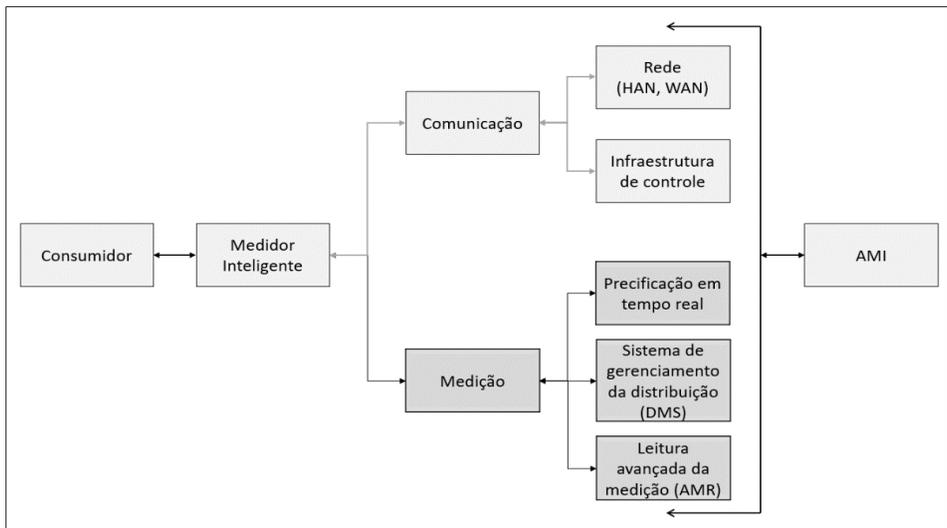


Fig. 2 Estrutura da solução AMI.

Os medidores inteligentes são a base da AMI. Sendo assim, eles são extremamente importantes para o conceito de Smart Grid, uma vez que são responsáveis pela medição do consumo de energia elétrica das residências e indústrias, além de outras funcionalidades. Dessa maneira, as concessionárias de energia conseguem maiores informações sobre o perfil de consumo de seus clientes, podendo utilizar esses dados para fornecer novos serviços aos consumidores (ZHENG, GAO e LIN, 2013). Além disso, os medidores inteligentes fornecem dados de qualidade da rede elétrica para que algoritmos de otimização calculem com maior eficiência e precisão situações de inconformidade na rede elétrica. As principais funcionalidades da Smart Grid que utilizam dados dos medidores inteligentes dependem da infraestrutura AMI conforme apresentada na figura 3.

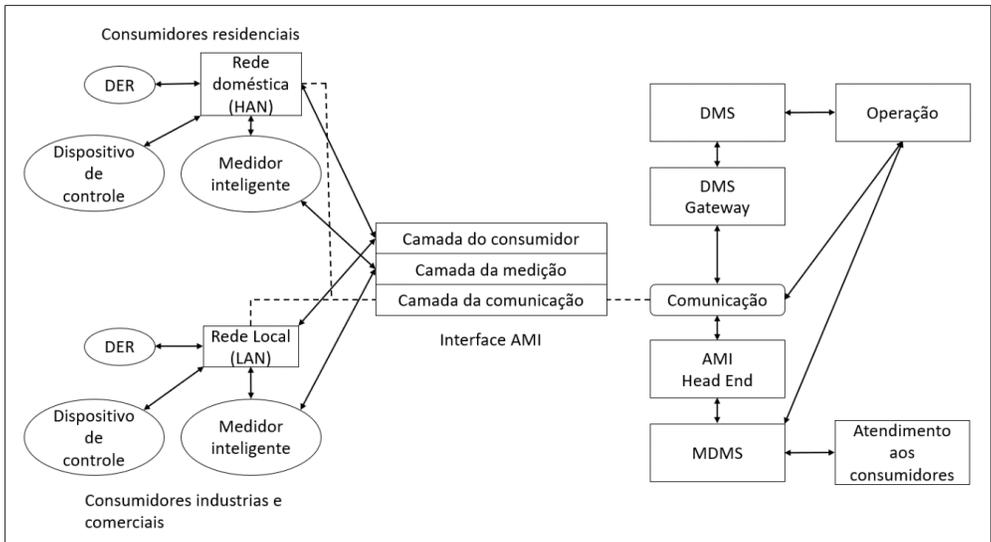


Fig. 3 Compartilhamento dos dados da solução AMI com outros sistemas.

Os principais sistemas apresentados na figura podem ser descritos como:

- **Distribution Management System (DMS):** sistema de gerenciamento da rede elétrica que consiste na manutenção da rede dentro dos parâmetros exigidos. A utilização desse sistema permite o aumento da confiabilidade e estabilidade da rede elétrica;
- **Distributed Energy Resource (DER):** realiza o gerenciamento das fontes de geração distribuída atuando para estabilização da rede elétrica;
- **Meter Data Management System (MDMS):** realiza o gerenciamento dos dados de longo prazo coletados pela aplicação AMI como tratamento e validação dos dados para fechamento de fatura.

Para que o medidor possa ser considerado “inteligente” é necessário que ele atenda, ao menos, aos seguintes requisitos:

- a) Comunicação bidirecional
- b) Função de coleta de dados
- c) Registro dos dados
- d) Armazenamento dos dados registrados
- e) Controle de carga
- f) Programação do medidor
- g) Segurança

h) Configuração do display

i) Configuração do faturamento

Contudo, a concessionária deve verificar as funcionalidades que os medidores inteligentes possuem e se estão convergentes com as aplicações de controle estabelecidas na sua Smart Grid (BARAI, KRISHNAN e VENKATESH, 2015). As principais funcionalidades dos medidores inteligentes solicitadas pelas concessionárias são:

- Leitura remota;
- Dados do perfil de carga;
- Acesso a dados medidos sob demanda;
- Opção de tarifas variáveis;
- Gerenciamento remoto dos medidores;
- Conexão e desconexão remota;
- Qualidade do fornecimento;
- Detecção de violação do medidor e roubo de energia elétrica;
- Detecção de falta de energia;
- Detecção do uso de energia sob demanda.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pelo estabelecimento dos requisitos técnicos para conexão dos medidores a rede elétrica e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é o órgão responsável por estabelecer os limites de erros metrológicos das grandezas elétricas registradas pelos medidores (CARVALHO, 2015). Contudo, nenhum dos órgãos trata especificamente de medidores inteligentes, ou seja, não regula as funcionalidades dos medidores inteligentes, deixando livre para que cada fabricante desenvolva as funcionalidades que serão aplicadas a seus medidores.

Visando auxiliar as concessionárias de energia elétrica na avaliação da escolha do medidor inteligente que melhor atenda seus objetivos na implementação do conceito de Smart Grid em sua estrutura, o LABORATÓRIO DE REDE INTELIGENTES – NAPREI — USP – desenvolveu um emulador de carga e gerador de eventos de distúrbios para que os medidores inteligentes fossem testados. Nesses testes são avaliadas a aplicação e os limites de atuação de cada funcionalidade do medidor inteligente. Dessa maneira, são analisadas possíveis falhas que possam acontecer no momento da implantação desses medidores nas concessionárias de energia.

Este artigo apresenta a taxonomia das funcionalidades dos medidores inteligentes dos fabricantes que possuem seus medidores homologados no INMETRO até 2019, pois

uma vez homologados podem ser instalados e estão de acordo com o padrão metrológico da instituição. Logo, o Laboratório de rede inteligente não visa realizar os testes metrológicos, e sim, as funcionalidades dos medidores

## 2 | METODOLOGIA

As seções a seguir apresentam os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 Laboratório de Redes Inteligentes / NAPREI

O laboratório de redes inteligentes / NAPREI conta com uma plataforma inovadora que usa sistemas ciber físicos para integrar simuladores de redes de energia, dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), medidores inteligentes, infraestrutura de comunicação e sistemas de operação típicas de concessionárias de energia, como sistema supervisorio de controle e aquisição de dados (SCADA), sistema de Informação geográfica (GIS), sistema de gerenciamento de dados de medição (MDM) e sistema de gerenciamento de distribuição (DMS) com objetivo de testar e validar funcionalidades de automação avançada de distribuição (ROSA, 2019)

Além disso, o laboratório possui uma infraestrutura para a realização dos testes relacionados às funcionalidades da solução AMI. Chamada de ilha de medição, a infraestrutura contempla um conjunto de 40 emuladores de carga/geração dispostos em painéis conforme apresentado na figura 4 a seguir.

Os emuladores feitos foram projetados para sensibilizarem os medidores inteligentes com valores de tensão entre 25 V e 250 V e valores de corrente entre 0,01 A e 15 A. Os emuladores de carga possuem três canais de tensão e três canais de corrente todos independentes e podem gerar sinais com ângulos de fase entre 0° e 360° a partir do sinal de sincronismo com sinal de sua alimentação, desta forma, esses emuladores podem simular qualquer situação de consumo ou geração de um consumidor de energia ou de um evento na rede elétrica de distribuição.



Fig. 4 Imagem dos painéis da ilha de medição.

É importante destacar que os emuladores de carga ou geração podem ser configurados de modo manual, modo em que se faz sua configuração local automático, modo em que ele recebe a imputação dos sinais de configuração por meio de uma rede de comunicação MODBUS.

A capacidade de testes simultâneos depende do tipo dos medidores inteligentes, podendo-se testar até 120 medidores monofásicos ou 40 trifásicos.

Cada medidor é alimentado por um emulador de carga capaz de impor aos medidores condições controláveis de consumo ou geração de energia através do controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada uma das tensões e correntes que percorrerão o circuito de medição do equipamento.

A ilha de medição está integrada à infraestrutura de medição do laboratório constituída por um sistema de comunicação que utiliza protocolo DLMS/COSEN para integração com o sistema de coleta dos dados e gerenciamento das medições (MDC/MDM). Dessa forma, os medidores inteligentes enviam, através da infraestrutura de comunicação, os registros de medição emulados para o MDC/MDM, que disponibiliza as medições para os demais sistemas utilizados nos testes.

## 2.2 Taxonomia para Funcionalidades de Medidores Inteligentes

As principais funcionalidades avaliadas nesse artigo estão divididas em 3 blocos, sendo que cada bloco foi dividido de acordo com as funcionalidades afins, conforme apresentado a seguir:

- Bloco 1: avaliação das funcionalidades que envolve a qualidade do fornecimento da energia elétrica;
- Bloco 2: avaliação das funcionalidades referentes aos alarmes de segurança de operação e configuração do medidor inteligente.

- Bloco 3: avaliação das funcionalidades referentes aos alarmes utilizados para detecção de tentativas de fraudes nos medidores inteligentes.

Itens	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
1	Desequilíbrio de corrente	Abertura do relé	Abertura de caixa de medição
2	DRP por fase	Fechamento do Relé	Corrente de neutro
3	DRC por fase	Abertura local do relé	Corrente de neutro medido diferente do calculado
4	Máximo DRP	Fechamento local do relé	Corrente reversa
5	Máximo DRC	Alteração de parâmetros	Deteção da abertura da tampa do bloco de terminais
6	Limite baixo de DRP	Falha de criptografia ou autenticação	Deteção da abertura da tampa do NIC
7	Limite máximo de DRP	Ajuste do relógio	Deteção da abertura da tampa principal
8	Limite baixo de DRC	Indicador de troca de bateria	Deteção da remoção do NIC
9	Limite máximo de DRC	Estado da bateria	Deteção de fechamento da tampa do bloco de terminais
10	Máximo DRP no último mês	Ativação de múltiplas tarifas	Deteção de fechamento da tampa principal
11	Máximo DRC no último mês	Alteração de múltiplas tarifas	Deteção de início do campo magnético
12	Ângulo entre as tensões	Erro de Ram	Deteção de Movimento
13	Ângulo entre tensão e corrente por fase	Erro na memória não volátil	Deteção do término do campo magnético
14	Fator de potência por fase	ERRO na memória flash	Duração do campo magnético
15	Fator de potência baixo	Erro de watchdog	Erro de autenticação de usuário
16	Identificação do fator de potência	Erro no sistema de medição	Falha de autenticação
17	Fator de potência Total	Firmware válido para ativação	Falha de comunicação
18	Frequência total	Firmware ativado	Falha no relé (abertura do relé)
19	Frequência por fase	Indicação de que o medidor foi zerado	Fechamento de caixa de medição
20	Swell	Configuração do perfil de carga	Presença de corrente sem tensão
21	Sag	Falta da fase A	Reset do medidor
22	Amplitude do evento de VTCD	Falta da fase B	Tempo de abertura da tampa do bloco de terminais
23	Duração do evento de VTCD	Falta da fase C	Tempo de abertura da tampa principal
24	Frequência de ocorrência de eventos de VTCD	Início e fim da falta de fase	Tensão pós abertura do relé
25	DIC	Fluxo de potência reverso	-----
26	FIC	Last gasp	-----
27	DMIC	Retorno da falta de energia	-----
28	Distorção harmônica individual de tensão da ordem h (DITH)	Temperatura alta	-----
29	Distorção harmônica total de tensão (DTT)	Horário de verão	-----
30	Sequência de fase invertida	Status do módulo de comunicação	-----
31	Sobrecorrente	Falha no NIC	-----
32	Subcorrente	Falha no relógio	-----
33	Tensão máxima	Alteração do relógio	-----
34	Tensão mínima	Reset de parâmetros	-----
35	Subtensão	Limpeza de evento	-----
36	Sobretensão	Falta de corrente	-----
37	Subtensão entre fases	-----	-----
38	Sobretensão entre fases	-----	-----
39	Corrente de neutro	-----	-----
40	Falta de longa duração	-----	-----

Tabela 2. Funcionalidades dos medidores inteligentes divididas por blocos

### 3 I RESULTADO DOS TESTES EM LABORATÓRIO

A taxonomia proposta foi aplicada para as funcionalidades de modelos de medidores inteligentes de 5 fabricantes distintos, sendo que todos os fabricantes possuem seus equipamentos homologados no INMETRO. Visando resguardar os fornecedores dos medidores, esses serão tratados como fabricantes A, B, C, D, e E.

A Tabela 3 apresenta o resultado da comparação por bloco, verificando-se que os fabricantes A, B e E estão direcionando seus produtos para o atendimento do bloco 2, que atende a segurança de operação do equipamento. Em contrapartida, o fabricante D é o que menos atende o bloco 2.

Quando analisado o bloco 1 – qualidade da energia elétrica – os fabricantes B, D e E consideram esse segmento como uma função secundária. Já o fabricante F considera esse item como prioritário no desenvolvimento do seu produto, apesar de apresentar um nível relativamente menor quando comparado aos outros fabricantes.

Em relação ao bloco 3 – detecção de fraudes – os fabricantes C e D consideram que esse bloco é prioridade no desenvolvimento de seus medidores inteligentes. Os fabricantes B, E e F avaliam esse bloco como uma função terciária. Ressalta-se que apesar dessa consideração, os fabricantes B e E atendem, no mínimo, 50% das funcionalidades especificadas nos blocos.

<b>Descrição</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
Bloco 1	49%	63%	37%	49%	59%	34%
Bloco 2	83%	78%	33%	28%	67%	31%
Bloco 3	63%	54%	42%	54%	50%	21%

Tabela 3. Resultado dos fabricantes por bloco

A Fig. 5 apresenta o gráfico do nível de atendimento de cada fornecedor e o nível de atendimento médio dos três blocos de avaliação.

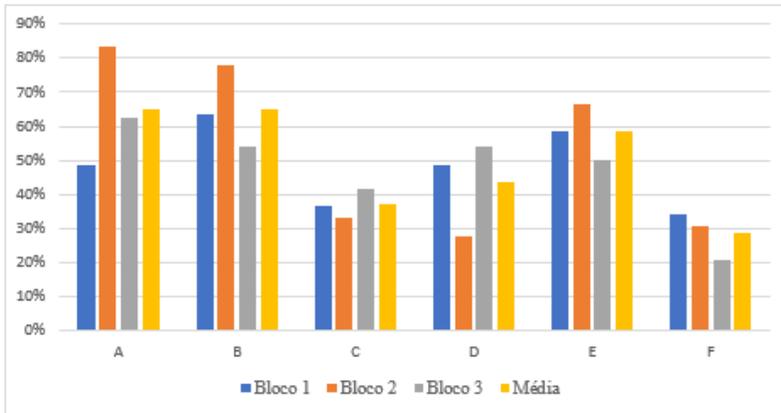


Fig. 5 Gráfico de atendimento aos blocos de avaliação.

## 4 | CONCLUSÕES

Os medidores inteligentes nas redes Smart Grid são essenciais não somente para a área de medição e faturamento, mas também para a operação da rede elétrica, pois viabilizam o amplo monitoramento da rede, permitindo melhorias nos projetos de expansão de rede, melhorias nas técnicas de localização de defeitos, mitigação de perdas comerciais e melhoria na qualidade do produto e do serviço.

Algumas concessionárias de rede elétrica reúnem milhões de consumidores devido a extensão da área de concessão. Dessa forma, demonstra-se necessário, em razão da extensão da área de concessão e eventuais peculiaridades de determinados trechos, que as concessionárias avaliem os equipamentos conforme o foco de atuação, por exemplo, perdas técnicas, qualidade de energia e prevenção e combate as perdas elétricas.

Visando auxiliar as concessionárias de energia na escolha dos modelos de medidores inteligentes esse artigo apresentou uma proposta de metodologia para teste e avaliação de medidores inteligentes e suas funcionalidades de 5 fabricantes de medidores inteligentes a partir de testes em laboratório visando avaliar aplicações para Smart Grids.

Nessa avaliação foi observado que cada fabricante direciona seus produtos para atender determinados blocos funcionais definidos nesta metodologia, sendo que o bloco 2 (segurança de operação do equipamento) é considerado pela maioria dos fabricantes como item prioritário, seguido do bloco 1 (qualidade da energia) e do bloco 3 (detecção de fraudes). Entretanto, é possível observar que todos os fabricantes precisariam melhorar, em maior ou menor grau, sua pontuação em cada um dos blocos funcionais.

O ambiente do Laboratório de Smart Grids do Enerq/USP mostrou-se adequado para os testes das funcionalidades de medidores inteligentes escolhidas para a taxonomia proposta, com destaque para o emulador de cargas, que permitiu a conclusão dos testes com sucesso.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que cada concessionária deverá avaliar qual o perfil de medidor mais adequado para as necessidades em sua área de concessão, comparando as funcionalidades dos medidores com os requisitos técnico/funcionais de sua infraestrutura AMI. Isto se deve à grande diferença entre os medidores avaliados, uma vez que cada fabricante está desenvolvendo seus produtos com foco em determinados blocos. Logo, um medidor com prioridade no atendimento a qualidade da energia elétrica pode não atender as demandas ao atendimento a prevenção de fraude, por exemplo.

Por fim, a proposta de metodologia para testes e avaliação de medidores inteligentes com foco nas aplicações de Smart Grids apresentada neste trabalho mostrou-se aderente para a descrição e classificação das funcionalidades e pode ser utilizada para comparação dos medidores inteligentes disponíveis no mercado brasileiro.

## REFERÊNCIAS

BARAI, Gouri R.; KRISHNAN, Sridhar; VENKATESH, Bala. **Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review**. In: 2015 *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 2015. p. 138-145.

BHATT, Jignesh; SHAH, Vipul; JANI, Omkar. **An instrumentation engineer's review on smart grid: Critical applications and parameters**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 1217-1239, 2014.

CARVALHO, Priscila. **Smart metering deployment in Brazil**. *Energy Procedia*, v. 83, p. 360-369, 2015.

CECATI, Carlo et al. **An overview on the smart grid concept**. In: *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010. p. 3322-3327.

DILEEP, G. **A survey on smart grid technologies and applications**. *Renew. Energy*, v. 146, p. 2589-2625, 2020.

ESCOBEDO, G.; JACOME, Norma; ARROYO-FIGUEROA, Gustavo. **Business Intelligence and Data Analytics (BI&DA) to Support the Operation of Smart Grid-Business Intelligence and Data Analytics (BI&DA) for Smart Grid**. In: *Special Session on Recent Advancement in IoT, Big Data and Security*. SCITEPRESS, 2016. p. 489-496.

KABALCI, Yasin. **A survey on smart metering and smart grid communication**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 302-318, 2016.

ROSA, Luiz H. L. et al. **A Systemic Approach for Assessment of Advanced Distribution Automation Functionalities**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, p. 2008 - 2017, Oct. 2019.

ZHENG, Jixuan; GAO, David Wenzhong; LIN, Li. **Smart meters in smart grid: An overview**. In: 2013 *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. IEEE, 2013. p. 57-64.

## 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