

# 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 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:** 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**

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>



## LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 06/11/2020

### **Mayara Helena Moreira Nogueira dos Santos**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/4648710745305057>

### **Matheus Felipe Ayello**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/2018035671612323>

### **Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/1223942716595516>

### **André da Costa Pinho**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/011784931880335>

### **Angelo Cesar Colombini**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/5358889614280850>

### **Márcio Zamboti Fortes**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
<https://orcid.org/0000-0003-4040-8126>

### **Yona Lopes**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói - RJ  
ORCID: 0000-0002-8068-2640

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma discussão acerca dos meios de transmissão mais utilizados para teleproteção e dos métodos de comparação de estados para teleproteção. São apresentadas e discutidas as principais métricas e requisitos para avaliação da comunicação. A necessidade de avaliação da latência para envio de mensagens de teleproteção, mesmo com tráfego de serviços concorrentes, como vídeo, voz, supervisão e controle foi levantada com base na análise da literatura. O cenário de teleproteção tradicional também foi comparado com o cenário via rede de comunicação e a latência alcançada via rede foi inferior às do cenário com fio piloto, conforme avaliação em laboratório. Verificou-se o impacto gradativo do aumento de tráfego concorrente na latência da teleproteção.

**PALAVRAS - CHAVE:** Teleproteção; IEC-61850; GOOSE; Automação.

### COMMUNICATION LATENCY FOR TELEPROTECTION SCHEMES: REQUIREMENTS, EVALUATIONS AND TRANSMISSION MEANS

**ABSTRACT:** This work presents a discussion about the most used teleprotection transmission means and comparing state methods for teleprotection. The fundamental metrics and requirements for evaluating communication are presented and discussed. The latency evaluation needed for teleprotection messages, even with concurrent traffic from services, such as video, voice, supervision, and survey control, was raised based on the literature analysis. The traditional teleprotection scenario was also compared with the communication network scenario, and

the latency achieved via the network scenario was shorter than the traditional scenario, as assessed in the laboratory. There is a gradual impact on the latency of teleprotection signals when the concurrent network traffic increases.

**KEYWORDS:** Teleprotection; IEC-61850; GOOSE; Automation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os sistemas de teleproteção tem como objetivo principal reduzir o tempo ativo de uma falta na Linha de Transmissão (LT) e, conseqüentemente, os danos ocasionados por esta falta (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001). O aumento da complexidade das redes elétricas traz a elevação dos níveis de exigências relativos à seletividade e à velocidade de teleproteção. Diante desse cenário, os sistemas de telecomunicação envolvidos devem possuir requisitos de latência, banda e disponibilidade capazes de atender às demandas impostas.

Dentre os esquemas de teleproteção, os de comparação de estado exigem requisitos menos rigorosos em relação aos sistemas de comunicação. Segundo (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001), as mensagens enviadas entres terminais são: direcionalidade da corrente; status do disjuntor; bloqueio do religamento automático; transferência de disparo, entre outros. Apesar do tráfego ser caracterizado apenas por informações binárias, a integridade das mensagens deve ser assegurada, mesmo sob a presença de ruído e outras fontes de interferência, que podem corromper a comunicação entre os terminais. Um ponto crítico neste cenário é o compartilhamento do meio de comunicação com outros serviços como voz, vídeo, supervisão e controle.

A comunidade científica tem explorado a avaliação de sistemas de comunicação para teleproteção. (DOLEZILEK; KALRA, 2017) apresentam um amplo panorama das soluções de comunicação considerando suas fraquezas e potencialidades. No entanto, há poucos artigos que avaliem essa comunicação e também o impacto do aumento do tráfego de outros serviços que não o de teleproteção.

Este trabalho avalia o desempenho da comunicação para teleproteção (especificamente do esquema POTT) via *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e com ligação direta com fio de cobre. A avaliação inclui a injeção de tráfego oriundo de serviços concorrentes como voz, dados, supervisão, etc. Para esta avaliação configurou-se um ambiente de teste composto de dois *Intelligent Electronic Devices* (IEDs), SEL-421-3 e SEL-451-2, um switch e um servidor de sincronismo temporal. Os softwares utilizados para a configuração do cenário foram o *AcSELerator Quickset* e *Architect*.

## 2 | TELEPROTEÇÃO

Devido à extensão, as LTs são mais vulneráveis à ocorrência de eventos prejudiciais ao sistema elétrico de potência. O tempo de permanência de uma falta em uma LT é crucial

para o desempenho dos sistemas elétricos. Desta forma, mecanismos que maximizem a velocidade de atuação são de suma importância.

Latências superiores a 20 ciclos podem causar instabilidade no sistema. Por esse motivo, o Grupo de Trabalho (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001) discorre sobre a utilização de sistemas de telecomunicações nos esquemas de proteção de linhas, a fim de agilizar o comando de disparo, que pode ser executado entre 2 a 3 ciclos após a ocorrência da falta, em qualquer ponto da linha.

Nestes esquemas, a saída de contato do relé - ou do IED - é convertida em um sinal e enviada por um meio de transmissão até o outro terminal. Na extremidade receptora, o sinal é convertido em uma saída de contato, que é associada a uma entrada de controle no esquema lógico do relé receptor. Os meios de transmissão mais utilizados em esquemas de teleproteção, tanto como meio principal, como redundância, são: o fio piloto (fio de cobre), circuitos de telefonia privada, enlaces micro-ondas, ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão (OPLAT) e enlaces via satélite.

O fio piloto foi, e ainda é muito utilizado como canal de comunicação para os sistemas de teleproteção. Trata-se de um condutor físico utilizado para transmitir o sinal de comunicação entre as unidades de proteção localizadas nos terminais da área protegida. Os condutores podem ser fios telefônicos, cabos elétricos e fios nus. A comunicação é realizada por um par destes condutores utilizando níveis de corrente contínua ou alternada (60Hz) ou sinais de áudio. No caso dos sinais de áudio, os comandos de proteção são enviados por meio de tons de áudio na banda de telefonia (300 a 3000 Hz). Destaca-se que a vulnerabilidade desse canal é elevada pois o mesmo é suscetível a uma série de intempéries ou inconformidades do sistema, tais como quedas de tensão, tensões induzidas e aumento da tensão no neutro durante a ocorrência de faltas. Em função disso, esta alternativa tem seu uso limitado a pequenas distâncias, geralmente 10 a 12 km. No estudo de (BEHRENDT, 1996) o retardo total de propagação com o fio piloto ficou entre 13,6 e 17,6 ms.

Os sistemas de rádio, por sua vez, satisfizeram uma crescente demanda por capacidade de comunicação em muitas concessionárias (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001). Antes da adoção da fibra óptica para aplicação em sistemas de proteção, os enlaces de micro-ondas representavam o único meio de transmissão em banda larga. Outro motivo para utilização desta tecnologia é a considerável imunidade à interferência eletromagnética produzida pelas redes de alta tensão.

Com OPLAT as próprias linhas de transmissão são utilizadas como canais de comunicação. A comunicação é feita por meio da modulação da informação em uma onda portadora de alta frequência. O enlace é confinado na área de proteção por meio de bobinas de bloqueio. O sinal é capturado por filtros passa faixa e decodificado na unidade receptora. Esta tecnologia não necessita de repetidoras para longa distância - alcançam 800 km – e tem custo reduzido, o que fez com que fosse intensamente utilizada em linhas de alta

tensão para a transmissão de voz, dados de controle e sinais de proteção (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001).

A transmissão por micro-ondas é feita pelo ar numa faixa de frequência de 3 GHz até 30 GHz, tornando o sistema sensível às condições atmosféricas. A distância máxima é limitada pela linha de visada e sua implementação é mais cara quando comparada ao OPLAT. No entanto, tal tecnologia opera em banda larga e destaca-se pela independência entre o sistema de comunicação e o sistema de proteção. Desta forma, ao contrário do OPLAT, falhas na linha de transmissão não afetam o sistema de comunicação.

Estes sistemas satisfizeram uma crescente demanda por capacidade de comunicação dentre muitas concessionárias (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001). Antes da adoção da fibra óptica para aplicação em sistemas de proteção, os enlaces de micro-ondas representavam o único meio de transmissão em banda larga.

Enlaces de fibra óptica para o sistema de teleproteção são similares ao fio piloto onde ao invés do cabo metálico é utilizado o par de fibras. A distância de comunicação direta entre as unidades transmissora e receptora depende do tipo de fibra utilizada, das atenuações provocadas por emendas e conectores, assim como pelo ganho das unidades geradoras e repetidoras utilizadas para cobrir distâncias maiores. A imunidade à interferência eletromagnética, banda larga, precisão, dimensões e peso reduzidos são vantagens conhecidas da fibra óptica.

O cabo *Optical Power Ground Wire* (OPGW) é um cabo metálico utilizado para proteção de descargas atmosféricas. Este cabo é utilizado como cabo guarda e é aterrado nas torres de transmissão, com isso, na ocorrência de uma descarga atmosférica, a energia elétrica é conduzida até a torre mais próxima. Em seu interior o OPGW acomoda um conjunto de pares de fibras ópticas que não sofrem influência das descargas atmosféricas e possibilitam a transmissão de dados. Com a substituição dos cabos pára-raios convencionais por cabos OPGW os enlaces convencionais via rádio micro-ondas ou OPLAT gradativamente deram espaço para a utilização de fibra óptica e redes de comunicação, que possuem maior capacidade de transmissão e possibilidade de redundância em esquemas de comparação de estados.

## 2.1 Esquema de Comparação de Estado

Esquemas de comparação de estado – conhecidos também por esquemas de teleproteção por sinalização – utilizam canais de comunicação para compartilhar informações lógicas de estados em ambos os terminais da linha. Assim, os IEDs são capazes de eliminar todos os tipos de falta na linha de transmissão de forma instantânea e seletiva (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001). Informações que trafegam por esses canais de comunicação podem ser de direcionalidade da corrente; status do disjuntor; bloqueio do religamento automático; transferência de disparo, entre outros (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001). No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

recomenda em (ELÉTRICO, 2011) que os esquemas de transferência de disparo devam ser redundantes e independentes entre si.

A comparação de estado entre equipamentos de diferentes subestações (SEs) pode ser feita simplesmente pela conexão de um cabo entre elas. Um cabo de cobre ligando os relés de cada terminal da SE é condição suficiente para o estabelecimento do enlace de comunicação. No entanto, a vulnerabilidade desse canal é elevada pois o mesmo é suscetível a uma série de intempéries ou inconformidades do sistema, tais como quedas de tensões, tensões induzidas e aumento da tensão no neutro durante a ocorrência de faltas tornam esse canal vulnerável.

Segundo reportado em (MEIRA et al., 2018), existem seis esquemas básicos de teleproteção, definidos de acordo com a característica da zona de impedância (subalcance ou sobrealcance) que dará a partida da transmissão do sinal no relé. As várias nomenclaturas, comumente usadas na literatura técnica para descrição desses esquemas, são descritas em (ORDACGI, 2010). Neste artigo, o enfoque é dado no esquema de teleproteção Transferência de Disparo Permissivo por Sobrealcance (POTT).

## 2.2 Transferência de Disparo Permissivo Por Sobrealcance

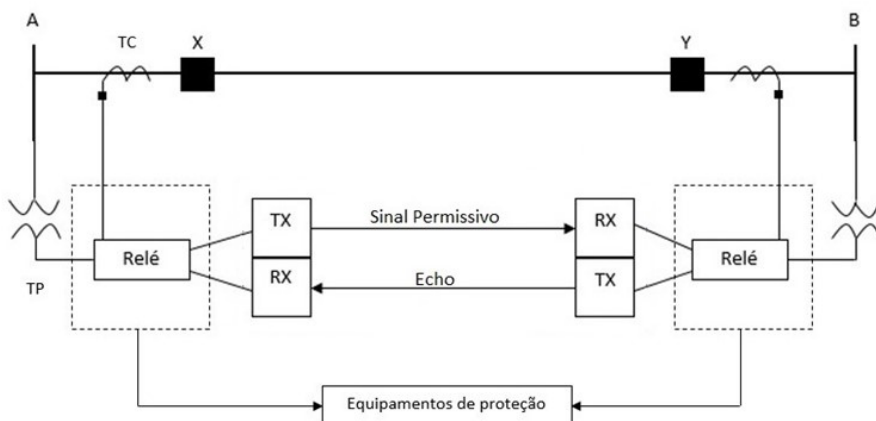


Figura 1. Esquema *Permissive Overreaching Transfer Trip* (POTT) com lógica Echo.

A Figura 1 ilustra o esquema de teleproteção POTT. Esse esquema de teleproteção utiliza a zona 2 de sobrealcance para sua lógica. No instante em que o relé localizado no terminal A detectar uma falta por zona 2, ele envia um sinal permissivo para o relé localizado no terminal B. O relé B, detectando a falta também por zona de sobrealcance e recebendo o sinal permissivo do relé localizado no terminal A, abrirá o disjuntor Y e enviará um sinal permissivo para o relé A, que irá abrir seu disjuntor X (FERRER; SCHWEITZER III, 2010). O esquema POTT também pode incluir a lógica echo, que caso um terminal esteja aberto,

o sinal permissivo recebido do terminal remoto é ecoado, permitindo assim a eliminação de faltas no final da linha (LABORATORIES, 2020a). Nesse cenário, onde ambos relés precisam ser sensibilizados pela falta e se comunicarem, é de suma importância a garantia de integridade do canal de comunicação. Caso o canal de comunicação esteja inoperante esse esquema não funcionará corretamente. Em (MIVEH; MIRSAEIDI, 2012) foram resumidas as características básicas de um esquema POTT conforme Tabela 1.

Vel. Operação	1.5 - 2 ciclos
Resistência de falta	Baixa
Linhas terminais (max.)	15
Banda	9.6 - 38.4 kbps
Consequência da perda do sinal	Falha no trip

Tabela 1. POTT – Características básicas

### 2.3 IEC 61850

A norma IEC-61850 padroniza a rede e sistemas de comunicação para automação do sistema elétrico. A estrutura de dados da norma é composta por uma disposição hierárquica que reúne as classes, objetos, atributos e instâncias como mostrado na Figura 2.

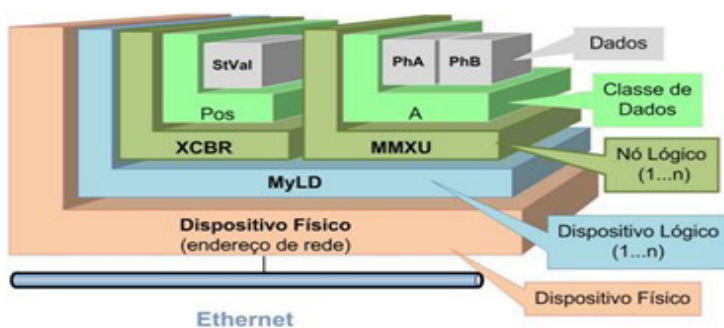


Figura 2. Estrutura de dados da IEC 61850, retirado de (LOPES et al., 2012).

Uma vez que o dispositivo lógico é acessado, é possível seguir a hierarquia apresentada por ele até a obtenção do dado apresentado. A comunicação pertinente a norma pode ser apresentada por diferentes arquiteturas e protocolos. As principais

arquiteturas de comunicação entre os dispositivos físicos, relativa à norma IEC-61850, são: *Two Party Application Association* (TPAA) ou *MultiCast Application Association* (MCAA) (LOPES et al., 2012).

A arquitetura TPAA é geralmente utilizada para controle, supervisão e configuração. Tal arquitetura baseia-se no modelo cliente-servidor e apresenta alto nível de confiabilidade devido às autenticações decorrentes na comunicação TCP. A arquitetura MCAA permite a troca unidirecional entre um ou mais destinos com o modelo *publisher-subscriber* (publicador/assinante) em uma conexão ponto a ponto. Para os testes de teleproteção, que serão apresentados nas seções seguintes, foi empregada a arquitetura MCAA em virtude da característica de comunicação ponto a ponto, assim como, por ser capaz de encapsular mensagens GOOSE.

A norma dispõe de 3 protocolos de comunicação, são eles: *Sampled Values* (SV), *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e *Manufacturing Message Specification* (MMS). As mensagens SV fornecem uma comunicação eficaz para envio de dados de medição, já as mensagens GOOSE oferecem uma alternativa veloz para a comunicação de eventos, principalmente entre IEDs. Por fim, as mensagens MMS, arquitetura TPAA, são utilizadas para realizar a supervisão da subestação e o controle quando partido do operador. Esse estudo concentra-se na utilização de mensagens GOOSE, sendo sua utilização apropriada para esquemas de teleproteção.

## 2.4 Teleproteção com Goose

A parte 90-1 da norma IEC 61850 apresenta o uso do GOOSE para comunicação entre subestações. A GOOSE faz uso do modelo *publisher-subscriber* (publicador-assinante). O IED publicador possui a tarefa de enviar as mensagens designadas para a rede via endereçamento *multicast Media Access Control* (MAC), assim a mensagem está disponível na rede para qualquer dispositivo que deseja assiná-la. O dispositivo assinante faz a leitura das mensagens desejadas através do mesmo endereço MAC com que estas foram publicadas na rede. Uma das vantagens deste protocolo é não necessitar de um supervisão (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*), ou seja, caso um IED detecte uma falta, por meio das leituras de Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs), e a abertura do disjuntor falhar, o mesmo IED pode enviar uma mensagem GOOSE para outros IEDs, indicando a ocorrência de um evento de falha de disjuntor ou *breaker failure*.

O tempo de transmissão das mensagens GOOSE é um somatório de tempos. A Figura 3 detalha esses tempos como T1, T2, T3 e T0, sendo estes o tempo do IED publicador inserir a mensagem no topo de sua pilha de comunicação, o tempo da mensagem trafegar pela rede e o tempo do IED assinante extrair a mensagem da rede, respectivamente.

Para garantir a entrega das mensagens, o protocolo funciona baseado em um mecanismo de retransmissão cíclica das mensagens, mesmo quando não há ocorrência de

eventos na rede, conforme observa-se no tempo  $T_0$  ilustrado na Figura 3. Ao ser detectado um evento (transição binária de pelo menos uma das variáveis do conjunto de dados) pelo IED, ocorre uma rajada de retransmissões de mensagens GOOSE que crescem em progressão geométrica, até atingirem o tempo máximo de repetição  $T_0$ , cujo valor é configurado pelo usuário (OLIVEIRA; LOPES, 2018).

Os atrasos na transmissão das mensagens GOOSE podem variar de acordo com a prioridade do *frame* e volume de tráfego. Atrasos de processamento nos equipamentos intermediários, quantidade de equipamentos e quantidade de tráfego são exemplos de características que devem ser consideradas durante a realização dos testes.



Figura 3. Mecanismo de retransmissão GOOSE (OLIVEIRA; LOPES, 2018).

### 3 | TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização da norma IEC 61850 para teleproteção tem sido amplamente discutida na literatura (OLIVEIRA; LOPES, 2018), bem como o esquema POTT. Em (BARTOSIEWICZ; JANUSZEWSKI; RASOLOMAMPIONONA, 2013) foram realizados testes em uma LT com equipamentos de proteção da General Eletric, considerando diferentes esquemas de teleproteção, utilizando abordagens modernas para a comunicação com fio piloto. Para o esquema POTT, especificamente, os testes foram conduzidos de forma a se avaliar a coordenação entre dois IEDs L90 e também contemplaram a utilização de dois meios de comunicação, Ethernet utilizando GOOSE e conexão direta via fibra óptica. Entretanto esse trabalho não avalia a latência de operação em relação ao congestionamento da rede.

O artigo de (MIRANDA et al., 2014) avaliou o comportamento do tráfego de mensagens GOOSE, em um canal ethernet, entre subestações de energia para o esquema POTT. Além disso, a perda de mensagens entre publicadores e assinantes foi cuidadosamente monitorada. Nesse trabalho foram avaliados parâmetros como intensidade do tráfego e lógica de atuação. Cabe destacar que para o desenvolvimento destes experimentos, um laboratório foi equipado com três relés digitais, *switches* ethernet, conversores de mídia, computadores, 20 Km de fibra óptica e diversos softwares de suporte. Os resultados



mostraram que as mensagens GOOSE podem ser aplicadas à comunicação entre subestações, considerando um tempo de transferência em torno de 4,4 ms. Além disso, os autores verificaram que as condições de tráfego e as configurações dos *switches* podem influenciar decisivamente na perda de mensagens GOOSE usadas para a coordenação de esquemas POTT.

Os autores em (GUPTA et al., 2017) destacaram que a viabilidade econômica da adoção da IEC 61850 na automação de subestações se daria pela redução dos custos referentes à implantação e manutenção relativas a uma infraestrutura de comunicação e controle bem mais simples.

Apesar de não ser um trabalho conduzido por experimentos em laboratório, o artigo de (SANTOS et al., 2018) apresenta uma caracterização robusta acerca dos retardos em uma rede de comunicação, operando com a IEC 61850 para coordenação entre subestações de energia. Os autores propõem uma metodologia analítica de cálculo para estimação dos retardos que envolvem processamento, transmissão de mensagens e atrasos de tempo na fila e de modo consequente, realizam simulações capazes de caracterizar o atraso do tráfego. O trabalho destaca que apesar dos retardos serem melhor estimados por meio de simulações estatísticas, encontrar o limite superior desse parâmetro pode ser computacionalmente custoso, além de tomar muito tempo, tornando a estimação analítica mais atrativa.

Em (BARTMAN; ROWLAND; ROGERS, 2019) foi analisado o comportamento do tráfego GOOSE para o esquema POTT. O estudo apresentou uma contribuição na configuração de dados da rede e do tráfego na transferência de mensagem GOOSE de acordo com parâmetros de teleproteção. Apesar das contribuições citadas, o artigo não possui uma avaliação para outros meios de comunicação para esquemas de POTT.

Em (DOLEZILEK et al., 2015) é avaliada a comparação dos protocolos propostos neste artigo, contudo o trabalho não apresenta testes, sendo assim, é exposta uma avaliação qualitativa com carência de um ambiente de implementação.

Com relação aos requisitos de comunicação, a implementação de um sistema de teleproteção deve assegurar a máxima disponibilidade do serviço e segurança das instalações (COMMISSION, 2010). Com relação aos sistemas de comunicação aplicados à teleproteção, os principais atributos a serem avaliados são: segurança, tempo de transmissão, tempo de operação e de proteção, tempo de propagação, confiabilidade, redundância, entre outros (WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT, 2001), (ELÉTRICO, 2011). Cabe destacar que um dos componentes principais que impacta na latência total para o tempo de atuação é o tempo de transmissão.

O estudo de (GUERRERO, 2011) avalia o impacto que a implementação da norma IEC 61850 causa no tempo de operação na teleproteção em relação ao uso de interfaces tradicionais. O resultado deste trabalho demonstra que a adoção da norma favoreceu o sistema de comunicação no sentido da diminuição da latência.

Em (DOLEZILEK; KALRA, 2017) também são avaliados os requisitos temporais de diferentes tipos de comunicação. O trabalho fornece um comparativo dos métodos disponíveis para troca de sinais via mensagens digitais e apresenta o desempenho das mais populares tecnologias comunicação. Além disso, os autores exploram os efeitos da sobrecarga do canal de comunicação no desempenho da teleproteção.

Em (OLIVEIRA; LOPES, 2018) foi avaliado o tempo de comunicação via mensagens GOOSE. Nesse estudo foram realizados testes reais em um anel com cinco subestações, onde verificou-se uma latência média de 4,14 ms para transmissão entre duas subestações.

Em (MEIRA et al., 2018) é analisado a interoperabilidade entre relés via dois esquemas, POTT e *Directional Comparison Blocking* (DCB). O método para essa análise consiste no uso do *software* CAPE e dois relés SEL. No estudo são aplicadas faltas em uma linha de transmissão protegida e em uma linha adjacente. O estudo correlaciona o tempo de atuação para esses dois cenários, ratificando as vantagens do uso de esquemas de proteção já citados.

A Tabela 2 consolida a pesquisa feita acerca dos principais requisitos dos sistemas de comunicação avaliados por diversos autores. Tais contribuições acadêmicas relacionadas à comunicação para o esquema do POTT, e os respectivos requisitos de comunicação foram estudados e constatou-se que a latência é um fator crítico e que poucos trabalhos realizam o comparativo do uso de teleproteção tradicional via cabo e GOOSE, avaliando o desempenho em termos de métricas de rede. Face ao exposto, deu-se um enfoque diferencial para a avaliação em laboratório da velocidade das mensagens GOOSE sob diferentes condições de carga do canal de comunicação, além de comparar o meio de comunicação com fio piloto e via rede. Estas avaliações são especialmente importantes para decisões acerca das implicações do uso do compartilhamento do meio de comunicação utilizado para teleproteção com outros serviços como voz, dados de controle e supervisão, vídeo, etc, que são preocupações atuais do ONS. Foram utilizados equipamentos reais encontrados em subestações para uma análise mais robusta, conforme descrito na Seção 4.

Autor/Requisito	1	2	3	4	5	6
(BARTOSIEWICZ; JANUSZEWSKI; RASOLOMAMPIONONA, 2013)			X	X		
(MIRANDA et al., 2014)			X		X	
(SANTOS et al., 2018)			X			
(BARTMAN; ROWLAND; ROGERS, 2019)		X	X			
(DOLEZILEK et al., 2015)			X			
(GUERRERO, 2011)	X	X	X	X	X	X
(DOLEZILEK; KALRA, 2017)			X			

(OLIVEIRA; LOPES, 2018)			X			
(MEIRA et al., 2018)			X	X		
(FODERO; HUNTLEY; ROBERTSON, 2018)			X			
(WARD; DAHLIN; INCE, 2004)		X	X			
(BACHLI; HAUSLER; KRANICH, 2017)			X	X		
(ELÉTRICO, 2011)	X	X	X	X	X	X
(SCHEER; WOODWARD, 2001)		X	X			
(SCHWEITZER III; KUMM, 1996)		X	X	X		

Tabela 2. Avaliação qualitativa dos requisitos de teleproteção: 1 - Confiabilidade; 2 - Segurança; 3 - Tempo de transmissão; 4 - Tempo de operação e de proteção; 5 - Tempo de propagação; 6 - Redundância

#### 4 I IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

O caso a ser estudado consiste na análise de uma linha de transmissão sob uma falta simulada, onde haverá troca de mensagens permissivas entre os IEDs. Neste contexto, avalia-se a comunicação entre IEDs através de dois ambientes de implementação, comunicação via teleproteção tradicional e via GOOSE.

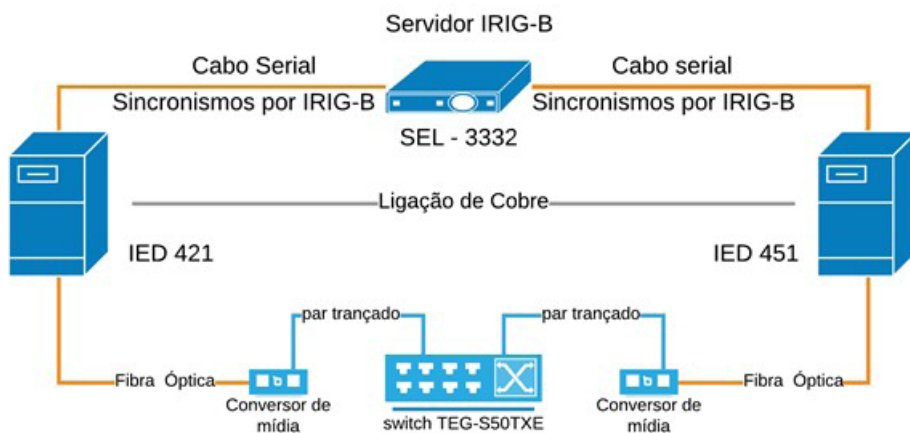


Figura 4. Arquitetura para implementação dos testes com os dois cenários de implementação: via ligação de cobre e via rede.

A arquitetura de ambos os cenários está ilustrada na Figura 4, composta por dois relés, modelos SEL-451-2 e SEL-421-3, um servidor IRIG-B SEL-3332, um *switch* TEG-S50TXE e dois conversores opto-elétricos (fibra óptica – par trançado).

Ressalta-se que, por mais que o sistema como um todo não estivesse sincronizado

em relação a uma referência global, ambos relés estavam em sincronia relativa, o que é suficiente para o estudo aqui apresentado. Os softwares utilizados para configuração dos IEDs foram o *AcSELeRator Quickset* e *Architect*.

Foram coletados os tempos em que a variável no IED de destino foi ativada e desativada, assim como, os instantes em que a variável de saída no IED de origem foi ativada e desativada. Desta forma, a latência total, incluindo o processamento nos IEDs, foi obtida como a diferença entre os tempos de ativação das respectivas variáveis. Os valores foram coletados através do *Sequential Events Register* (SER), via TELNET (POSTEL; REYNOLDS, 1983). A latência entre mensagens foi calculada com intervalo de confiança de 95%, conforme detalhado em (1).

$$\left( \underline{x} - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \underline{x} + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$\sigma$  - Desvio padrão populacional;

$\underline{x}$  - Tempo médio de detecção de falha;

$n$  - Número de amostragens.

#### 4.1 CENÁRIO COM ESQUEMA TRADICIONAL

Para o ambiente baseado no esquema de teleproteção tradicional, foi utilizada a arquitetura da Figura 5, especificamente a interligação via cabo de cobre.

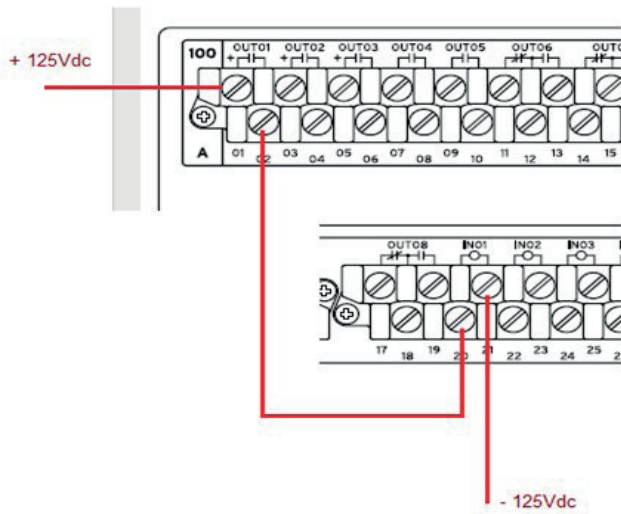


Figura 5. Ligações de cobre feitas no painel traseiro dos IEDs. (adaptada do datasheet do IED).

A comunicação via cabo de cobre foi configurada com uma ligação entre os relés e uma fonte externa, conforme mostra a Figura 6. Devido à ausência de uma fonte de corrente contínua com a magnitude necessária, foi feita uma retificação direta da rede, com o uso de um auto transformador a fim de se regular a tensão para +- 125V DC.

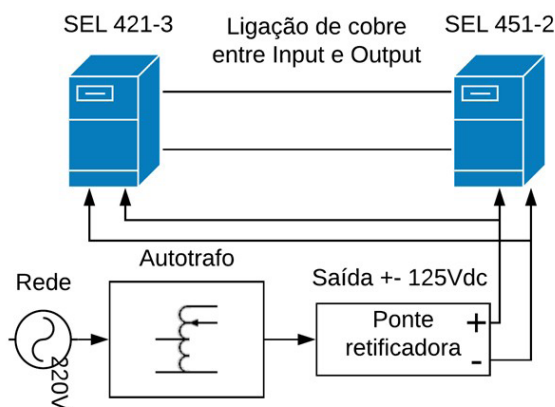


Figura 6. Cenário teste comunicação via cabo

A lógica configurada permitiu que o IED de origem comunicasse ao IED de destino a ocorrência de um trip de forma que ao receber esta mensagem permissiva, o IED de destino também execute o trip. O teste foi repetido 192 vezes a fim de garantir confiabilidade de 95% nos resultados. O tempo médio total de transmissão encontrado foi de 10 ms para este cenário.

## 4.2 Cenário com Esquema de Comunicação Via Goose

Para o segundo cenário utilizou-se o meio de comunicação via rede da Figura 4. O esquema POTT foi configurado através de mensagens GOOSE. Ressalta-se que a ligação anterior, com fio de cobre, era ponto-a-ponto e que no cenário com comunicação via GOOSE haviam 3 dispositivos intermediários: um *switch* e dois conversores de mídia.

O teste para esse segundo estudo visa analisar a latência na mensagem permissiva entre IEDs para o caso de utilização do esquema com uma rede de comunicação. Esse cenário é especialmente importante pois permite que outros serviços, tais como dados de voz, vídeo, controle e supervisão, passem a fazer uso (compartilhar) do mesmo meio de comunicação.

No relé SEL-451, criou-se uma simples lógica de envio de mensagens GOOSE para a rede, de forma controlada. Ao acionar um *pushbutton*, um oscilador lógico era iniciado, e mantinha seu funcionamento habilitado durante 1 minuto. Durante esse período, a cada 200 ms o oscilador mudava o estado (ora de zero para um e ora de um para zero) da

variável interna do relé. Cada transição dessa variável pode ser entendida como um novo evento, que é enviado via mensagem GOOSE para a rede. Após 1 minuto, cessa-se o envio de mensagens no teste, totalizando 300 mensagens disponíveis para estudo.

Os valores de latência obtidos nas simulações utilizando comunicação GOOSE se mostraram inferiores ao valor de latência utilizando uma comunicação via teleproteção tradicional conforme ressalta o gráfico da Figura 7. Esse fato deve-se ao tempo do contato de saída do IED transmissor, além das próprias características do meio de transmissão.

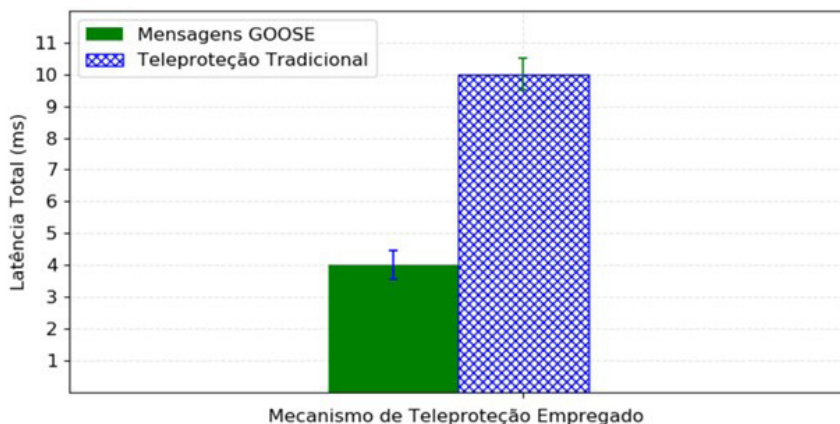


Figura 7. Histograma latência em transmissão de acordo com cada mecanismo de proteção.

### 4.3 Serviços Concorrentes com A Teleproteção

A fim de verificar o comportamento das mensagens de teleproteção, quando em concorrência com outros serviços foi realizado o último teste que avalia a latência das mensagens GOOSE em função do aumento de tráfego na rede. A arquitetura é a mesma da Figura 4, no entanto sem os conversores de mídia e com o *switch* SEL 2730M substituindo o *switch* TEG - S50TXE. A alteração foi realizada a fim de verificar se os dispositivos intermediários afetam também a latência.

Para tráfego de fundo na rede foi utilizado um computador com Core i7, 4 Gb de memória RAM, Windows 7 64 bits e uma máquina virtual VMware Workstation com Ubuntu 16.04 LTS 64-bit. Para injeção e medição de tráfego foi utilizada a ferramenta iPerf. A mesma lógica de envio de mensagens GOOSE do teste anterior foi reproduzida.

Os testes são definidos a seguir: o primeiro teste representa a injeção nula de tráfego de fundo, ou seja, não se acrescentou mensagens concorrentes na rede de comunicação. O segundo teste foi definido aplicando-se uma carga média de 30 Mbps de tráfego concorrente. O terceiro teste foi definido aplicando-se uma carga média de 60

Mbps de tráfego. O quarto e último foi definido com a maior carga gerada pelo software, cujo valor aproximado é de 100 Mbps. Em cada simulação, monitorou-se a latência entre as mensagens GOOSE na rede.

A Figura 8 apresenta o comparativo dos tempos de transmissão das mensagens, em relação à quantidade de tráfego concorrente existente na rede. Verificou-se que o tempo de transmissão aumentou gradativamente com a quantidade de tráfego concorrente. Esse resultado indica que o compartilhamento do meio de comunicação utilizado para teleproteção com outros serviços deve ser avaliado com cautela, já que a latência aumenta com a quantidade de tráfego. Cabe ainda destacar, que além do aumento no valor médio da latência na transferência das mensagens GOOSE, também houve um aumento na dispersão dos valores medidos para o intervalo de confiança de 95%, especialmente em 100 Mbps de tráfego de fundo, conforme mostrado na Figura 8. Dependendo da quantidade de tráfego gerado, a latência encontrada pode não ser adequada aos esquemas de teleproteção. Ressalta-se que os testes foram feitos em laboratório, em rede local, e que a distância entre as subestações tende a aumentar consideravelmente esta latência.

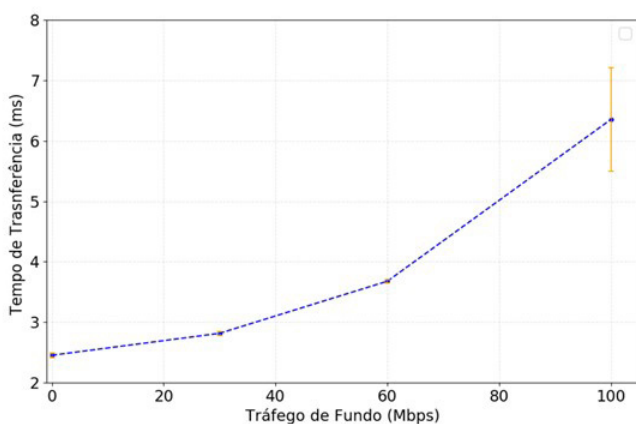


Figura 8. Comparativo da latência de mensagens GOOSE em relação a quantidade de tráfego concorrente ao de teleproteção na rede de comunicação.

## 5 | CONCLUSÃO

A norma IEC 61850 trouxe possibilidades de melhorias para esquemas tradicionais de proteção, principalmente no desempenho dos canais de comunicação entre os IED. Neste trabalho, foi avaliado o desempenho do envio de mensagens permissivas entre os relés a partir de duas formas distintas, via rede de comunicação através de mensagens GOOSE e via ligação direta com fio de cobre entre contatos metálicos nos IEDs.

Depois de uma intensa pesquisa bibliográfica sobre o tema, foi possível verificar a

escassez de contribuições acerca das novas tecnologias de proteção para o setor elétrico. Com as demandas avaliadas na norma IEC 61850 e requisitos intrínsecos à teleproteção, ainda prevalece uma carência de estudos quantitativos no ramo.

O estudo apresentado na Seção 4 mostra o impacto da latência em sistemas de teleproteção e, a partir dos testes executados, foi possível mensurar os tempos de transmissão das mensagens de teleproteção em diferentes cenários, com diferentes volumes de tráfegos de serviços concorrentes, como voz, vídeo e supervisão. Com isso pode ser comprovado que o aumento do tráfego de serviços concorrentes na rede de comunicação interfere diretamente no tempo de transferência das mensagens de teleproteção.

Além disso, verificou-se que a transmissão tradicional apresentou uma latência maior do que a transmissão via GOOSE, mesmo considerando os atrasos causados pelos equipamentos de rede (*switch* e conversores de mídia). Esses atrasos foram verificados quando da substituição do *switch* utilizado, resultando em uma diminuição na latência de 4 ms para 2,5 ms. Tal constatação demonstra que assim como a característica do meio, a arquitetura da rede também influencia diretamente a velocidade de transmissão. Arquiteturas mais simples e com menos dispositivos tendem a provocar menores latências. No caso dos testes discutidos na seção 4, a comunicação via fio piloto contabilizou o tempo de sensibilização dos contatos do relé, o que, provavelmente, aumentou o valor da latência avaliada. Ademais, foi possível observar que todos os valores respeitam o limiar de temporizações abaixo de 20 ciclos, como mencionado na seção 2.

O tempo de transferência na comunicação é uma variável diretamente dependente dos equipamentos de comunicação utilizados. Uma alternativa para verificar o impacto desta variável seria a configuração da priorização da teleproteção fazendo uso do campo de prioridade do frame Ethernet através do *Priority Code Point* (PCP), alocado no campo de VLAN para mensagens GOOSE. Deste modo, sugere-se a avaliação do desempenho de diferentes priorizações no serviço de teleproteção em relação ao cenário de serviços concorrentes.

## REFERÊNCIAS

BACHLI, R.; HAUSLER, M.; KRANICH, M. **Teleprotection solutions with guaranteed performance using packet switched wide area communication networks**. 2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE) College Station, TX: IEEE

BARTMAN, T.; ROWLAND, B.; ROGERS, L. **Expanding Protection and Control Communications Networks With Wireless Radio Links**. 2019 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC). Bloomington, MN, USA: IEEE, abr. 2019

BARTOSIEWICZ, E.; JANUSZEWSKI, M.; RASOLOMAMPIONONA, D. **Results of modern pilot schemes tests for general electric line protection devices**. 2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble, France: IEEE, jun. 2013



- BEHRENDT, K. C. **Relay-to-relay digital logic communication for line protection, monitoring, and control**. . In: 23RD ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, Washington: out. 1996
- COMMISSION, I. E. **Communication networks and systems for power utility automation, Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations**, 2010.
- DOLEZILEK, D. et al. **Simplifying Teleprotection Communications With New Packet Transport Technology**. . In: PAC WORLD AFRICA CONFERENCE. Johannesburg, South Africa: nov. 2015
- DOLEZILEK, D.; KALRA, A. **Lessons Learned: Benefits of Using Standardized Protocols to Replace Substation Copper Field Wiring With Digital Communications**. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION – RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS. Saint Petersburg, Russia: abr. 2017
- ELÉTRICO, O. N. DO S. **Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**, 2011.
- FERRER, H. J. A.; SCHWEITZER III, E. O. **Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems**. Pullman, WA: SEL, 2010. v. 1
- FODERO, K.; HUNTLEY, C.; ROBERTSON, P. **Deterministic communications for protection applications over packet-based wide-area networks**. 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). College Station, TX: IEEE, mar. 2018
- GUERRERO, C. A. V. **Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o Padrão IEC61850**. Dissertação de Mestrado—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2011.
- GUPTA, S. et al. Recent advancements in substation automation systems based on information and communication technologies. In: **Communication and Computing Systems: Proceedings of the International Conference on Communication and Computing Systems (ICCCS 2016)**, Gurgaon, India, 2016. Boca Raton.
- LABORATORIES, S. E. **Memória de Cálculo para os Ajustes do Relé de Proteção, Automação e Controle SEL-421**, 2020a.
- LOPES, Y. et al. **Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico**. XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBTr'12. DF: set. 2012
- MEIRA, R. N. et al. **Analysis of interoperability of relays via teleprotection**. 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE) Niterói: IEEE, maio 2018
- MIRANDA, J. C. et al. Behaviour Evaluation of GOOSE Message Traffic between Power Substations: A POTT Scheme Case Study. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 25, n. 2, p. 262–271, abr. 2014.
- MIVEH, M. R.; MIRSAEIDI, S. Introduction and Evaluation of Teleprotection Systems in Micro-Grids. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, jun. 2012.

OLIVEIRA, W.; LOPES, Y. **Teleprotection over SONET based on IEC 61850**. 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Niterói: IEEE, maio 2018

ORDACGI, J. **Proteção de Linhas de Transmissão: Teleproteção**. Campinas: CEPSE, 2010.

POSTEL, J.; REYNOLDS, J. K. **Telnet Protocol Specification**. [s.l.] RFC Editor, maio 1983. . Acesso em: 2 nov. 2020.

SANTOS, A. DOS et al. Characterization of Substation Process Bus Network Delays. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 5, p. 2085–2094, maio 2018.

SCHEER, G. W.; WOODWARD, D. A. **Speed and Reliability of Ethernet Networks for Teleprotection and Control**. . In: 3RD ANNUAL WESTERN POWER DELIVERY AUTOMATION CONFERENCE. Spokane, Washington: abr. 2001

SCHWEITZER III, E. O.; KUMM, J. J. **Statistical Comparison and Evaluation of Pilot Protection Schemes**. . In: 23RD ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. out. 1996

WARD, S.; DAHLIN, T.; INCE, B. **Pilot protection communication channel requirements**. 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2004. College Station, TX, USA: IEEE, 2004

WORKING GROUP 34/35.11 – CIGRÉ JOINT. **Protection using telecommunications**, ago. 2001.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

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

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

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

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