

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

## Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

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

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

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

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

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

## **APRESENTAÇÃO**

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

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

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

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

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

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

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

### **CAPÍTULO 2..... 13**

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

Pedro Henrique Camargos  
Ricardo Elias Caetano  
Marcel Fernando da Costa Parentoni

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

### **CAPÍTULO 3..... 25**

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

Rogério Martins de Souza

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

### **CAPÍTULO 4..... 39**

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

Manuel Arturo Rendón Maldonado  
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

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

### **CAPÍTULO 5..... 54**

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

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

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

### **CAPÍTULO 6..... 71**

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

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento  
Lilian de Fátima Costa Santos

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

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

**CAPÍTULO 7..... 83**

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

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

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

**CAPÍTULO 8..... 97**

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

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

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

**CAPÍTULO 9..... 112**

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

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

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

**CAPÍTULO 10..... 126**

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

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

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

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

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

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

**CAPÍTULO 17.....224**

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

Luciano de Oliveira Daniel  
Sergio Luis Varricchio

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

**CAPÍTULO 18.....240**

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

Sergio Luis Varricchio  
Cristiano de Oliveira Costa

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

**CAPÍTULO 19.....256**

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

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

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

**CAPÍTULO 20.....264**

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

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

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

**CAPÍTULO 21.....277**

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

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

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

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

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

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 06/10/2020

**Sergio Luis Varricchio**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –  
CEPEL  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/5825024551486331>

**Cristiano de Oliveira Costa**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica –  
CEPEL  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/5094272372321272>

Nota: trabalho originalmente publicado no VIII SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, promovido pela Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

**RESUMO:** Neste trabalho é apresentado o cálculo de sensibilidades de polos e zeros em relação ao comprimento de linhas de transmissão (LTs) representadas pelo modelo de Bergeron. Este tipo de informação pode ser útil quando existem dúvidas sobre os valores dos parâmetros de determinadas LTs, ou, em estudos envolvendo contingências, quais LTs devem ser prioritariamente consideradas. A aplicação das sensibilidades de um polo em um estudo de comportamento harmônico é apresentada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensibilidades; Polos; Zeros; Linhas de Transmissão; Modelo de Bergeron.

### POLE AND ZERO SENSITIVITIES WITH RESPECT TO THE LENGTH OF TRANSMISSION LINES REPRESENTED BY THE BERGERON MODEL

**ABSTRACT:** This work presents the calculation of pole and zero sensitivities with respect to the length of transmission lines (TLs) represented by the Bergeron model. This type of information may be useful when there are doubts about the parameter values of certain TLs or, in studies involving contingencies, which TL outages should be primarily considered. The application of the sensitivities of a pole in a power system harmonic analysis is presented.

**KEYWORDS:** Sensibilities; Poles; Zeros; Transmission Lines; Bergeron Model.

## 1 | INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado o cálculo de sensibilidades de polos e zeros em relação ao comprimento de linhas de transmissão (LTs) representadas pelo modelo de Bergeron, recentemente implementado no programa HarmZs (CEPEL, 2016) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas), objetivando sua compatibilização (Varricchio & Campello, 2019) com o Alternative Transients Program - ATP (para simulação no tempo de transitórios eletromagnéticos) (Leuven EMTP Center, 1990). Ambos os programas são largamente utilizados no setor elétrico brasileiro e recomendados

nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (Operador Nacional do Sistema – ONS, 2017). O modelo de Bergeron é de grande interesse por ser recomendado pelo ONS nas Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão (Operador Nacional do Sistema – ONS, 2013) e, conseqüentemente, bastante utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos.

Estas sensibilidades podem ser úteis quando existem dúvidas sobre os valores dos parâmetros de determinadas LTs, ou, em estudos envolvendo contingências, quais LTs devem ser prioritariamente consideradas.

O desenvolvimento matemático, necessário para a realização analítica deste cálculo, é apresentado em detalhes. Os resultados analíticos são comparados com os obtidos por aproximações numéricas, mostrando excelentes concordâncias, validando, desta forma, as expressões matemáticas obtidas.

## 2 I CONCEITOS BÁSICOS

O comportamento dinâmico de um sistema MIMO (*Multi-Input Multi-Output*) de ordem  $n$  no domínio da frequência complexa  $s$ , com  $p$  saídas e  $m$  entradas, representadas pelos vetores  $\mathbf{y}(s)$  e  $\mathbf{u}(s)$ , respectivamente, pode ser descrito por (Varricchio, et al., 2018; Gomes Jr., et al., 2006; Varricchio, et al., 2004; Varricchio, 2015; Varricchio & Gomes Jr., 2018):

$$\mathbf{Y}(s) \mathbf{x}(s) = \mathbf{B} \mathbf{u}(s) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(s) + \mathbf{D} \mathbf{u}(s) \quad (2)$$

onde  $\mathbf{Y}(s) \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $\mathbf{x}(s) \in \mathbb{C}^n$ ,  $\mathbf{u}(s) \in \mathbb{C}^m$  e  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{p \times m}$ . O sobrescrito  $T$  denota transposição de matrizes ou vetores.

De acordo com (Varricchio, et al., 2018; Gomes Jr., et al., 2006; Varricchio, et al., 2004; Varricchio, 2015; Varricchio & Gomes Jr., 2018), no caso do sistema em consideração ser uma rede elétrica com  $n_b$  barras e  $n_f$  fontes de tensão, tem-se:

$$\mathbf{Y}(s) = \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{Y}_{\text{bus}}(s) & -\mathbf{F}^T \\ \hline \mathbf{F} & \mathbf{Z}_f(s) \end{array} \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{x}(s) = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{v}(s) \\ \mathbf{i}_f(s) \end{array} \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{u}(s) = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{i}(s) \\ \mathbf{v}_f(s) \end{array} \right] \quad (5)$$

onde  $\mathbf{Y}_{\text{bus}}(s) \in \mathbb{C}^{n_b \times n_b}$  é a matriz de admitâncias nodais do sistema desconsiderando as fontes de tensão. A matriz  $\mathbf{F}$  é composta por linhas e colunas. As linhas da matriz  $\mathbf{F}$  são compostas por elementos nulos exceto nas posições correspondentes às barras entre as quais as fontes de tensão estão conectadas. Nestas posições, os elementos possuem valores iguais a 1 (correspondente à barra onde a corrente da fonte entra) e

-1 (correspondente à barra onde a corrente da fonte sai). Caso uma destas barras seja a de referência, apenas o valor 1 deverá ser colocado na posição correspondente à outra barra. A matriz  $\mathbf{Z}_f(s)$  é diagonal, de dimensão igual a  $n_f$  e seus elementos são iguais às impedâncias internas das fontes. Os vetores  $\mathbf{v}_f(s)$  e  $\mathbf{i}_f(s)$  possuem dimensão igual a  $n_f$  e são compostos pelas tensões internas e correntes das fontes, respectivamente. Os vetores  $\mathbf{v}(s)$  e  $\mathbf{i}(s)$  possuem dimensões iguais a  $n_b$  e  $(m-n_f)$ , respectivamente, e são compostos pelas tensões e injeções de correntes nodais.

Resolvendo (1) para  $\mathbf{x}(s)$  e substituindo em (2), obtém-se:

$$\mathbf{y}(s) = [\mathbf{C}^T \mathbf{Y}(s)^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}] \mathbf{u}(s) \quad (6)$$

A expressão relacionando o vetor de saídas  $\mathbf{y}(s)$  com o de entradas  $\mathbf{u}(s)$  é definida como a matriz de funções de transferência (FTs)  $\mathbf{H}(s) \in \mathbb{C}^{p \times m}$ :

$$\mathbf{H}(s) = \mathbf{C}^T \mathbf{Y}(s)^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (7)$$

Para analisar apenas uma entrada  $u(s)$  e uma saída  $y(s)$  (sistema SISO, *Single-Input Single-Output*), deve-se selecionar as colunas  $\mathbf{b}$  e  $\mathbf{c}$  apropriadas das matrizes  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{C}$ , respectivamente, e um elemento  $d$  da matriz  $\mathbf{D}$ , resultando na FT escalar:

$$H(s) = \mathbf{c}^T \mathbf{Y}(s)^{-1} \mathbf{b} + d \quad (8)$$

### 3 I SENSIBILIDADES DE POLOS E ZEROS

A sensibilidade de polos e zeros é muito útil quando deseja-se identificar quais os parâmetros do sistema que, quando variados, causam um deslocamento significativo de determinados polos ou zeros no plano complexo.

Os valores de  $s$  que tornam  $H(s)$ , dada em (8), infinita são por definição seus polos, enquanto que os valores de  $s$  que tornam  $H(s)$  nula são seus zeros. Para que  $H(s)$  tenda a infinito, cada um de seus polos deve tornar a matriz  $\mathbf{Y}(s)$  singular. Por este motivo, os polos não dependem das variáveis escolhidas para a função de transferência, ou seja, não dependem de  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  e  $d$ . Os pólos, portanto, dependem apenas da matriz  $\mathbf{Y}(s)$ . Por outro lado, os zeros dependem da função de transferência escolhida, ou seja, dependem de  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  e  $d$ . Por este motivo, normalmente utiliza-se a denominação “polos do sistema”, ao invés de “polos de  $H(s)$ ”, porém utiliza-se a denominação “zeros de  $H(s)$ ” e não “zeros do sistema”.

De acordo com (Haley, 1988; Gomes Jr., 2002), um polo atende às seguintes equações, considerando que a matriz  $\mathbf{Y}$  do sistema, além de ser função de  $s$  (com  $s$  tendo o valor  $\lambda$  do polo), também é função de um parâmetro  $p$ :

$$\mathbf{Y}(\lambda, p) \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (9)$$

$$\mathbf{w}^T \mathbf{Y}(\lambda, p) = \mathbf{0}^T \quad (10)$$

Além de ser um polo do sistema,  $\lambda$  pode ser interpretado também como um autovalor da matriz  $\mathbf{Y}$  (Haley, 1988; Gomes Jr., 2002). Nesta interpretação,  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{w}$  são os autovetores à direita e à esquerda, respectivamente, associados a  $\lambda$ .

A diferencial total de (9) é dada por:

$$\frac{\partial \mathbf{Y}(\lambda, p)}{\partial s} \mathbf{v} d\lambda + \frac{\partial \mathbf{Y}(\lambda, p)}{\partial p} \mathbf{v} dp + \mathbf{Y}(\lambda, p) d\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (11)$$

Pré-multiplicando (11) por  $\mathbf{w}^T$  e considerando (10), obtém-se:

$$\frac{d\lambda}{dp} = - \frac{\mathbf{w}^T \frac{\partial \mathbf{Y}(\lambda, p)}{\partial p} \mathbf{v}}{\mathbf{w}^T \frac{\partial \mathbf{Y}(\lambda, p)}{\partial s} \mathbf{v}} \quad (12)$$

Deve-se observar que o algoritmo de polos dominantes, descrito nas referências (Gomes Jr., 2002; Varricchio, et al., 2001), fornece os valores de  $\lambda$ ,  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{w}$ .

Se  $\mathbf{Y}$  é uma função de  $s$  e  $p$ , a FT  $H$  também será. Logo, (8) pode ser reescrita como:

$$H(s, p) = \mathbf{c}^T \mathbf{Y}(s, p)^{-1} \mathbf{b} + d \quad (13)$$

Por definição, um zero  $z$  de  $H$  atende a:

$$H(z, p) = 0 \quad (14)$$

A partir da diferencial total de (14), chega-se a:

$$\frac{dz}{dp} = - \frac{\frac{\partial H(z, p)}{\partial p}}{\frac{\partial H(z, p)}{\partial s}} \quad (15)$$

De acordo com (13), tem-se:

$$\frac{\partial H(z, p)}{\partial p} = \mathbf{c}^T \frac{\partial \mathbf{Y}(z, p)^{-1}}{\partial p} \mathbf{b} \quad (16)$$

Seja  $\Psi$  uma matriz quadrada inversível qualquer, função de uma variável  $\alpha$ . De (Varricchio, 2015; Varricchio, et al., 2015), tem-se:

$$\frac{d\Psi^{-1}}{d\alpha} = -\Psi^{-1} \frac{d\Psi}{d\alpha} \Psi^{-1} \quad (17)$$

Aplicando (17) em (16), obtém-se:

$$\frac{\partial H(z, p)}{\partial p} = -\mathbf{c}^T \mathbf{Y}(z, p)^{-1} \frac{\partial \mathbf{Y}(z, p)}{\partial p} \mathbf{Y}(z, p)^{-1} \mathbf{b} \quad (18)$$

Definindo

$$\mathbf{Y}(z, p) \mathbf{x}_b = \mathbf{b} \quad (19)$$

$$\mathbf{Y}(z, p)^T \mathbf{x}_c = \mathbf{c} \quad (20)$$

e substituindo em (18), obtém-se:



$$\mathbf{Y}_B = \begin{bmatrix} y_s & y_m \\ y_m & y_s \end{bmatrix} \quad (25)$$

onde:

$$y_s = (4/R)^2 [(R/4) - \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1] \quad (26)$$

$$y_m = -(4/R)^2 \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \quad (27)$$

sendo  $R$  a resistência total da LT e:

$$\mathbf{e}_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (28)$$

$$\mathbf{e}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (29)$$

$$\mathbf{M}(s, l) = \begin{bmatrix} m_a & m_b & 0 & 0 \\ m_b & m_c & m_d & 0 \\ 0 & m_d & m_c & m_b \\ 0 & 0 & m_b & m_a \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$m_a = \frac{4}{R} + y_c \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (31)$$

$$m_b = -y_c \operatorname{csch}\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (32)$$

$$m_c = \frac{2}{R} + y_c \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (33)$$

$$m_d = -\frac{2}{R} \quad (34)$$

A admitância característica  $y_c$ , a constante de propagação  $\gamma$  e a resistência total  $R$  da LT são dadas por:

$$y_c = \sqrt{C_l/L_l} \quad (35)$$

$$\gamma = s \sqrt{C_l L_l} \quad (36)$$

$$R = R_l l \quad (37)$$

onde  $C_l$ ,  $L_l$  e  $R_l$  denotam, respectivamente, a capacitância, a indutância e a resistência por unidade de comprimento  $l$  da LT.

Derivando (26) em relação à  $s$ , obtém-se:

$$\frac{\partial y_s}{\partial s} = -\left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{e}_1^T \frac{\partial \mathbf{M}^{-1}}{\partial s} \mathbf{e}_1 \quad (38)$$

Aplicando (17) à (38), obtém-se:

$$\frac{\partial y_s}{\partial s} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial s} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \quad (39)$$

Realizando procedimento análogo, chega-se a:

$$\frac{\partial y_m}{\partial s} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial s} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \quad (40)$$

Seja:

$$\mathbf{M} \mathbf{x} = \mathbf{e}_1 \quad (41)$$

onde  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ . De acordo com (41) e considerando que  $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T$ , tem-se:

$$\mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} = \mathbf{x}^T \quad (42)$$

Pode-se demonstrar facilmente que:

$$\mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} = [x_4 \ x_3 \ x_2 \ x_1] = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \quad (43)$$

onde  $\mathbf{P}$  é uma matriz de permutação dada por:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Substituindo (41) e (42) em (39) e (41) e (43) em (40), obtém-se, respectivamente:

$$\frac{\partial y_s}{\partial s} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{x}^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial s} \mathbf{x} \quad (45)$$

$$\frac{\partial y_m}{\partial s} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{x}^T \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial s} \mathbf{x} \quad (46)$$

Para computar os valores de (45) e (46) é necessário o cálculo da derivada da matriz  $\mathbf{M}$  em relação à  $s$ , ou seja, é necessário o cálculo da derivada de seus elementos em relação à  $s$ . Utilizando a regra da cadeia e algumas manipulações algébricas, chega-se a:

$$\frac{\partial m_a}{\partial s} = \frac{\partial m_c}{\partial s} = -\frac{m_b^2 L}{2} \quad (47)$$

$$\frac{\partial m_b}{\partial s} = -\frac{m_b [m_a - (4/R)] L}{2} \quad (48)$$

$$\frac{\partial m_d}{\partial s} = 0 \quad (49)$$

onde  $L = L_l$  é a indutância total da LT.

## 5 I DETERMINAÇÃO DE $\partial Y_B / \partial l$

De (34), tem-se que:

$$4m_d^2 = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \quad (50)$$

Substituindo (50) em (26) e (27), obtém-se, respectivamente:

$$y_s = 4m_d^2 [(R/4) - \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1] \quad (51)$$

$$y_m = -4m_d^2 \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \quad (52)$$

Derivando (51) em relação à  $l$ , obtém-se:

$$\frac{\partial y_s}{\partial l} = 8 m_d \frac{dm_d}{dl} \left[ \frac{R}{4} - \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \right] + 4m_d^2 \left[ \frac{d(R/4)}{dl} - \mathbf{e}_1^T \frac{\partial \mathbf{M}^{-1}}{\partial l} \mathbf{e}_1 \right] \quad (53)$$

Utilizando (17), (41) e (42), chega-se a:

$$\frac{\partial y_s}{\partial l} = 8 m_d \frac{dm_d}{dl} \left[ \frac{R}{4} - x_1 \right] + 4m_d^2 \left[ \frac{d(R/4)}{dl} + \mathbf{x}^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial l} \mathbf{x} \right] \quad (54)$$

Tem-se que:

$$\frac{d(R/4)}{dl} = \frac{R_l}{4} \quad (55)$$

Substituindo (55) em (54), obtém-se:

$$\frac{\partial y_s}{\partial l} = 8 m_d \frac{dm_d}{dl} \left[ \frac{R}{4} - x_1 \right] + 4m_d^2 \left[ \frac{R_l}{4} + \mathbf{x}^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial l} \mathbf{x} \right] \quad (56)$$

Realizando procedimento análogo, chega-se a:

$$\frac{\partial y_m}{\partial l} = -8 m_d \frac{dm_d}{dl} x_4 + 4m_d^2 \mathbf{x}^T \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial l} \mathbf{x} \quad (57)$$

Para computar os valores de (56) e (57) é necessário o cálculo da derivada da matriz  $\mathbf{M}$  em relação à  $l$ , ou seja, é necessário o cálculo da derivada de seus elementos em relação à  $l$ . Utilizando a regra da cadeia e algumas manipulações algébricas, chega-se a:

$$\frac{\partial m_a}{\partial l} = - \left( 2 \frac{dm_d}{dl} + \frac{1}{2} sL_l m_b^2 \right) \quad (58)$$

$$\frac{\partial m_b}{\partial l} = - \frac{1}{2} sL_l m_b (m_a + 2m_d) \quad (59)$$

$$\frac{\partial m_c}{\partial l} = \frac{\partial m_a}{\partial l} + \frac{dm_d}{dl} \quad (60)$$

$$\frac{dm_d}{dl} = \frac{2R_l}{R^2} \quad (61)$$

## 6 | SISTEMA TESTE

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando o sistema de transmissão mostrado na Fig. 1. Este sistema possui 34 barras, 25 LTs, 12 ramos “shunts” representando bancos de capacitores ou de indutores, 16 transformadores, 16 cargas e 10 geradores (fontes ideais de tensão). Os dados dos parâmetros de sequência positiva deste sistema estão apresentados na referência (Varricchio & Campello, 2019). A função de transferência selecionada para os experimentos numéricos e testes é a impedância própria da barra 21, destacada em vermelho na Fig. 1.

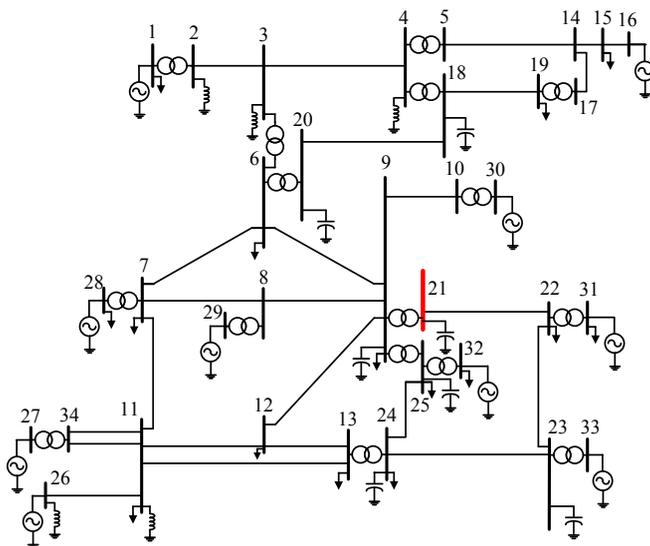


Fig. 1. Sistema de Transmissão.

Considerando a limitação de espaço e a grande similaridade entre as expressões de  $d\lambda/dl$  e  $dz/dl$  (dependem basicamente do cálculo de  $\partial\mathbf{Y}(s,l)/\partial l$  e de  $\partial\mathbf{Y}(s,l)/\partial s$ ), dadas por (12) e (23), respectivamente, se julgou necessário apresentar somente resultados relativos a  $d\lambda/dl$ . Observa-se, no entanto, que as conclusões e análise relacionadas à precisão no cálculo de  $d\lambda/dl$  são válidas também para  $dz/dl$ .

## 7 | VERIFICAÇÃO NUMÉRICA DE $d\lambda/dl$

Na Fig. 2 está mostrado o módulo da impedância própria da barra 21 do sistema de transmissão mostrado na Fig. 1. O pico de maior magnitude ocorre para a frequência de 1108 Hz, conforme indicado na figura.

A frequência de localização deste pico máximo indica que a parte imaginária do polo  $\lambda$  de maior dominância de  $z_{21,21}$  está próxima a  $j \times 2 \times \pi \times 1108 = j 6961.8$  rad/s. Utilizando

este valor como estimativa inicial para o algoritmo de polos dominantes, obtém-se o valor convergido do polo igual a  $\lambda = (\sigma + j\omega) = (-56.171 \text{ s}^{-1} + j 6966.4 \text{ rad/s})$ .

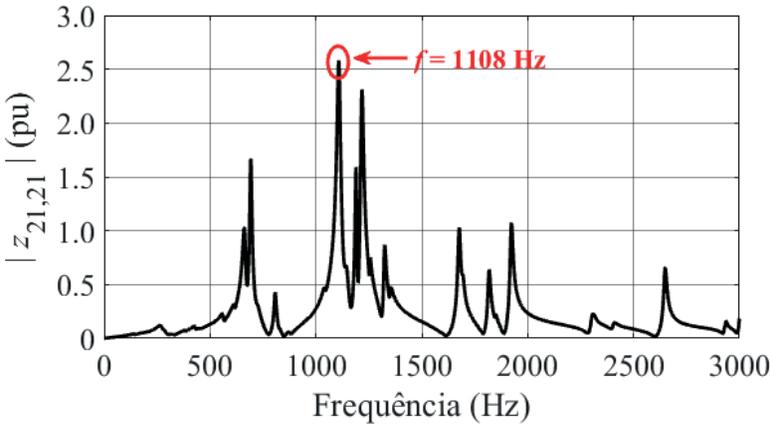


Fig. 2. Módulo da impedância própria da barra 21.

Na Tabela 1 estão apresentadas as partes real e imaginária das sensibilidades deste polo em relação aos comprimentos das LTs do sistema de transmissão representadas pelo modelo de Bergeron, denotadas por  $\Re(d\lambda/dl)$  e  $\Im(d\lambda/dl)$ , respectivamente.

O cálculo analítico de  $\frac{d\lambda}{dl}$ , realizado utilizando (12), pode ser verificado numericamente pela fórmula da diferença central, dada por (Kiusalaas, 2005):

$$\left. \frac{d\lambda(l)}{dl} \right|_{l=l_k} = \frac{d\lambda(l_k)}{dl} \cong \frac{\lambda(l_{k+1}) - \lambda(l_{k-1})}{2\Delta l} \quad (62)$$

onde  $\Delta l = (l_{k+1} - l_k) = l_k - l_{k-1}$ .

Na Fig. 3 estão mostrados os erros entre os valores das sensibilidades do polo  $\lambda = -56.171 + j 6966.4$  em relação aos comprimentos das LTs obtidos analítica e numericamente. Estes erros são definidos por:

$$\epsilon = \left| \frac{\left( \frac{d\lambda}{dl} \right)_{\text{Analítico}} - \left( \frac{d\lambda}{dl} \right)_{\text{Numérico}}}{\left( \frac{d\lambda}{dl} \right)_{\text{Analítico}}} \right| \times 100\% \quad (63)$$

O maior erro de sensibilidade encontrado foi de  $\epsilon_{\max} = 0.1015\%$  para a LT 16 (conectada entre as barras 15 e 16).

Nº LT	Barra		$\Re(d\lambda/dI)$ $s^{-1} [\Delta I (\%)]^{-1}$	$\Im(d\lambda/dI)$ $rad s^{-1} [\Delta I (\%)]^{-1}$
	de	para		
1	2	3	0.00070813	0.00030737
2	3	4	0.00066074	0.000466
3	5	14	1.2608e-05	9.6955e-06
4	6	7	0.0066747	-0.072498
5	8	7	0.0023743	-0.015606
6	8	9	0.001569	-0.014986
7	9	6	0.0057057	-0.070101
8	9	12	0.0083418	-0.096944
9	10	9	0.00044126	-0.0055218
10	11	7	0.01431	-0.13071
11	12	11	0.0037096	-0.046423
12	12	13	0.032179	-0.48155
13	13	11	0.01353	-0.092031
14	14	15	2.8831e-06	2.5847e-06
15	14	17	5.9359e-07	3.8419e-07
16	15	16	6.4227e-07	5.5647e-07
17	18	19	6.8907e-07	1.3116e-07
18	18	20	0.00069995	-0.00041304
19	21	22	1.3452	-13.979
20	23	22	-0.42104	-20.937
21	23	24	-1.0015	-9.4091
22	25	24	-1.4453	-6.8851
23	26	11	0.028343	-0.14266
24	34	11	5.7061e-05	-0.00050547
25	34	11	5.7061e-05	-0.00050547

Tabela 1: Partes real e imaginária das sensibilidades de  $\lambda = -56.171 + j 6966.4$  em relação ao comprimento das LTs

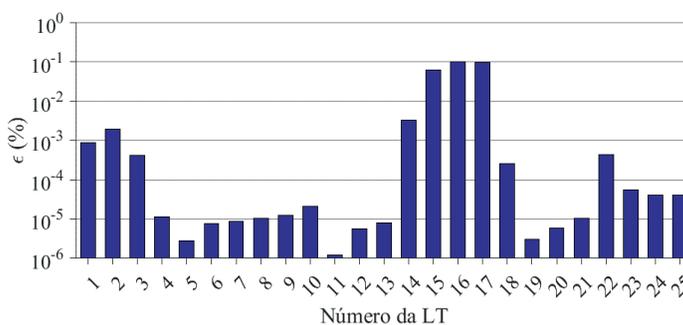


Fig. 3. Erros entre os valores das sensibilidades do polo  $\lambda = -56.171 + j 6966.4$  calculados analítica e numericamente.

## 8 I APLICAÇÃO PRÁTICA DE $d\lambda/dl$

De acordo com a Tabela 1, observa-se que o polo  $\lambda = -56.171 + j 6966.4$  possui altos valores de sensibilidades em relação aos comprimentos das LTs 19, 20, 21 e 22 (destacados em amarelo) e menores em relação aos comprimentos das demais LTs.

Tomando como exemplo a LT 20, se seu comprimento for diminuído, as partes real e imaginária de  $\lambda$  irão aumentar, uma vez que os valores de sensibilidades destas partes são negativos. Uma consequência óbvia do aumento da parte imaginária de  $\lambda$  é que a frequência de ressonância paralela localizada em 1108 Hz irá aumentar. O efeito do aumento da parte real não é tão óbvio, sendo analisado mais adiante. Por outro lado, se, por exemplo, o comprimento da LT 13 for dobrado, pouca alteração deverá ocorrer no valor de  $\lambda$ .

Supondo uma alteração de  $\Delta l = -20\%$  no comprimento da LT 20, pode-se estimar a consequente variação  $\Delta\lambda$  como:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &\cong \frac{d\lambda}{dl} \times \Delta l = -(0.42104 + j20.937) \times -20 \\ &= 8.4208 + j418.74\end{aligned}\quad (64)$$

Desta forma, a estimativa para o novo valor de  $\lambda$  é:

$$\lambda_{\text{estimado}} = \lambda + \Delta\lambda = -47.750 + j7385.1 \quad (65)$$

Considerando, agora, uma variação de  $\Delta l = 100\%$  no comprimento da LT 13, tem-se:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &\cong \frac{d\lambda}{dl} \times \Delta l = (0.01353 - j0.092031) \times 100 \\ &= 1.353 - j9.2031\end{aligned}\quad (66)$$

Logo:

$$\lambda_{\text{estimado}} = \lambda + \Delta\lambda = -54.818 + j6957.2 \quad (67)$$

As respostas em frequência do módulo da impedância própria da barra 21 estão mostradas na Fig. 4, considerando:

- Sistema original;
- Sistema com uma variação de  $-20\%$  no comprimento da LT 20 ( $\Delta l_{20} = -20\%$ );
- Sistema com uma variação de  $100\%$  no comprimento da LT 13 ( $\Delta l_{13} = 100\%$ ).

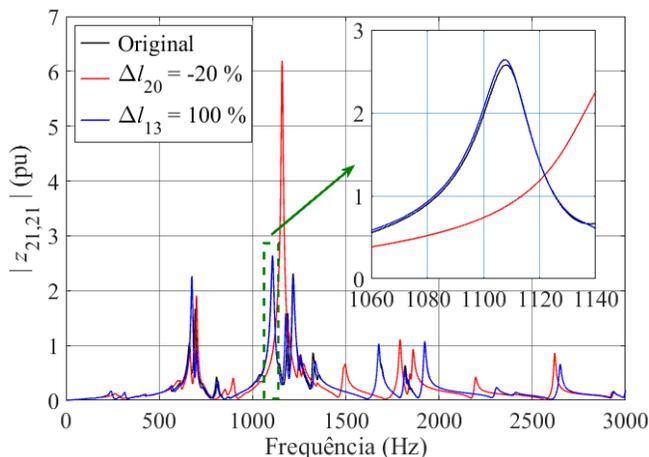


Fig. 4. Respostas em frequência do módulo de  $z_{21,21}$ , considerando o sistema original e com alterações nos comprimentos das LTs 20 e 13.

Como previsto, a variação de -20% no comprimento da LT 20 aumentou significativamente a frequência de ressonância paralela originalmente localizada em 1108Hz. Por outro lado, a variação de 100% no comprimento da LT 13 não alterou o valor desta frequência.

Na Tabela 2 está apresentado um resumo das características do polo mais dominante do sistema de transmissão original e modificado.

Sistema	Pico (Hz)	Estimativa de $\lambda$	Valor Final de $\lambda$	Resíduo de $\lambda$	$\hat{R}(\lambda)$
Original	1108	6961.8	$-56.171 + j6966.4$	$137.34 + j12.718$	2.4555
$\Delta l_{20} = -20\%$	1159	$-47.750 + j7385.1$	$-40.371 + j7283.0$	$240.75 + j10.571$	5.9693
$\Delta l_{13} = 100\%$	1108	$-54.818 + j6957.2$	$-55.583 + j6964.1$	$140.45 + j12.267$	2.5365

Tabela 2: Características do polo mais dominante do sistema de transmissão original e modificado

Os aumentos no valor da magnitude de  $z_{21,21}$ , na frequência de ressonância paralela originalmente localizada em 1108Hz, devidos às variações de -20% e 100% nos comprimentos das LTs 20 (aumento significativo) e 13 (ligeiro aumento), respectivamente, serão justificados a seguir utilizando as informações contidas na coluna designada por  $\hat{R}(\lambda)$  (índice de dominância de  $\lambda$ ).

De acordo com (Schilders, et al., 2008), se  $\lambda = \sigma + j\omega$  é dominante, a seguinte

aproximação é válida:

$$|z_{21,21}(j\omega)| \cong \left| \frac{R}{\sigma} \right| \quad (68)$$

De acordo com (68) e considerando que a frequência de ressonância  $\omega_r$  é aproximadamente igual a  $\omega$ , conclui-se que quanto maior for o módulo de  $R/\sigma$  maior será a contribuição (dominância) do polo  $\lambda$  para a magnitude de  $z_{21,21}(j\omega)$  e, conseqüentemente, para a magnitude de  $z_{21,21}(j\omega_r)$ . Por esta razão, uma das definições do índice de dominância  $\hat{R}$  do polo  $\lambda$  é (Schilders, et al., 2008):

$$\hat{R} = \left| \frac{R}{\sigma} \right| \quad (69)$$

Como se observa na última coluna da Tabela 2, houve aumento nos valores do índice de dominância de  $\lambda$  devidos às variações de -20% e 100% nos comprimentos das LTs 20 (aumento significativo) e 13 (ligeiro aumento), respectivamente, refletindo os aumentos que ocorreram no valor da magnitude de  $z_{21,21}$ .

## 9 | CONCLUSÕES

Neste trabalho é descrito em detalhes o desenvolvimento matemático necessário para o cálculo analítico de sensibilidades de polos e zeros em relação ao comprimento de LTs representadas pelo modelo de Bergeron, recentemente implementado no programa HarmZs do CEPEL, para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas.

Utilizando um sistema teste consistindo em um sistema de transmissão de médio porte, foi possível comparar os resultados analíticos com os obtidos por aproximações numéricas, mostrando excelentes concordâncias, validando, desta forma, as expressões matemáticas obtidas.

As sensibilidades  $d\lambda/dl$  do polo mais dominante  $\lambda$  da impedância própria de uma das barras do sistema teste em relação aos comprimentos de suas 25 LTs foram calculadas. Mostrou-se que uma variação de -20% no comprimento da LT com o maior valor de magnitude de  $d\lambda/dl$  resultou em uma variação significativa nos valores da frequência de ressonância e da magnitude desta impedância associados a  $\lambda$ . Por outro lado, uma variação de 100% no comprimento de uma das LTs com um baixo valor de  $d\lambda/dl$  praticamente não alterou estes valores.

Conclui-se, portanto, que incorreções nos comprimentos das LTs com altos valores de  $d\lambda/dl$ , causam maior impacto nos valores da frequência de ressonância e da magnitude da impedância associados a  $\lambda$ . Como o comprimento determina os valores totais da resistência, capacitância e indutância da LT, pode-se estender esta conclusão a incorreções nos valores destes parâmetros por unidade de comprimento. Portanto, em estudos de comportamento harmônico, estas sensibilidades podem ser utilizadas

para se determinar quais LTs são as mais responsáveis pela existência de ressonâncias paralelas próximas a frequências harmônicas importantes, como as de 5ª e 7ª ordens. Os parâmetros elétricos destas LTs com altos valores de sensibilidades devem ser conferidos e, eventualmente, recalculados e corrigidos no arquivo de entrada de dados para que os resultados de distorções harmônicas sejam precisos e confiáveis. É possível também se levantar dados relativos ao perfil da torre, aos condutores e ao solo (ao invés de aproveitar dados provenientes de arquivos de fluxo de potência), objetivando utilizar modelos mais precisos para estas LTs com altos valores de sensibilidades.

Outro possível exemplo de aplicação das sensibilidades de polos em relação ao comprimento de LTs, reside em estudos de comportamento harmônico envolvendo contingências. Neste caso, estas sensibilidades podem indicar quais LTs devem ser prioritariamente consideradas.

## REFERÊNCIAS

CEPEL, 2016. *Manual de Utilização do Programa HarmZs Versão 3.0.*, s.l.: s.n.

Gomes Jr., S., 2002. *Modelagem e Métodos Numéricos para Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ.

Gomes Jr., S. et al., 2006. *Equivalência entre as Modelagens do PacDyn e HarmZs para Análise de Ressonância Subsíncrona, Ressonâncias de Redes e Harmônicos*. Florianópolis, SC, Brasil, X SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica.

Haley, S. B., 1988. The Generalized Eigenproblem: Pole-Zero Computation. *Proceedings of the IEEE*, Volume 76.

Kiusalaas, J., 2005. *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*. New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Leuven EMTP Center, 1990. *ATP Rule Book*, s.l.: s.n.

Operador Nacional do Sistema – ONS, 2013. *Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão*, s.l.: s.n.

Operador Nacional do Sistema – ONS, 2017. *Submódulo 18.2 dos Procedimentos de Rede - Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais*, s.l.: s.n.

Schilders, W. H., Vander, H. A. V. & Rommes, J., 2008. *Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications*. New York, NY, USA: pringer.

Varricchio, S. L., 2015. *Modelagem e Análise de Redes Elétricas e Métodos de Redução da Ordem de Modelos Dinâmicos de Baixa e Alta Frequência*, Brasília, DF, Brasil: Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica pela UnB.

Varricchio, S. L. & Campello, T. M., 2019. Compatibility Among Electrical Network Component Models of Computational Power System Analysis Programs. *IEEE Latin America Transactions*, Volume 17, pp. 833-842.

Varricchio, S. L., Freitas, F. D., Martins, N. & Véliz, F. C., 2015. Computation of Dominant Poles and Residue Matrices for Multivariable Transfer Functions of Infinite Power System Models. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 30, pp. 1313-1142.

Varricchio, S. L. & Gomes Jr., S., 2018. Electrical Network Dynamic Models with Application to Modal Analysis of Harmonics. *Electric Power Systems Research*, Volume 154, pp. 433-443.

Varricchio, S. L., Jr., S. G. & Martins, N., 2001. *s-Domain Approach to Reduce Harmonic Voltage Distortions Using Sensitivity Analysis*. Columbus, Ohio, USA, IEEE Winter Meeting.

Varricchio, S. L. et al., 2004. *Advanced Tool for Harmonic Analysis of Power Systems*. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, IX SEPOPE - Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning.

Varricchio, S. L., Rossi, J., Costa, C. O. & Taranto, G. N., 2018. *Transient Short-Circuit Calculations Using Time Shifts and Rational Models – Preliminary Results*. Niterói, RJ, Brasil, VII SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.

## 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