

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

## Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

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

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

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

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

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

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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas

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

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

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

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

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

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Linguística, Letras e Artes**

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

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. 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> Livia 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>



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

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 06/11/2020

**Luciano de Oliveira Daniel**

Universidade Federal Fluminense – UFF  
Niterói – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/7865704282239421>

**Sergio Luis Varricchio**

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

Trabalho originalmente publicado no VIII SBSE –  
Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (2020).

**RESUMO:** O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma comparação entre as ferramentas Matlab e Python aplicadas à criação de protótipos para análise de sistemas elétricos de potência. Serão realizados testes comparativos de precisão entre as ferramentas para os principais métodos de transformação tempo-frequência, de quadratura numérica e de álgebra linear numérica aplicados à análise de sistemas de potência. Também será apresentada a visão crítica dos autores em relação às facilidades oferecidas por tais ferramentas, como ambientes de programação, editores de texto do código-fonte, funções para traçado de gráficos e depuradores de erros.

**PALAVRAS - CHAVE:** Matlab; Python;

Prototipação; Sistemas de Potência; Computação Numérica.

### PROTOTYPING TOOLS APPLIED TO POWER SYSTEMS: MATLAB VERSUS PYTHON

**ABSTRACT:** The main objective of this work is to present a comparison between Matlab and Python tools applied to the creation of prototypes for the analysis of electrical power systems. Comparative precision tests will be performed between the tools for the main time-frequency transformation methods, numerical quadrature and numerical linear algebra applied to the analysis of power systems. The authors' point of view will also be presented regarding the facilities offered by these tools, such as programming environments, source code text editors, graphical functions and error debuggers.

**KEYWORDS:** Matlab; Python; Prototyping; Power Systems; Numerical Computation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Nos centros de pesquisas e universidades ao redor do mundo, existe a necessidade da constante utilização de ferramentas/ambientes computacionais que facilitem e acelerem os testes e o desenvolvimento inicial (protótipo) de métodos, modelos matemáticos, algoritmos e provas de conceito aplicados a sistemas elétricos de potência e equipamentos associados.

O programa Matlab é uma ferramenta consagrada para este fim, que possui um ambiente de programação com diversos

métodos matemáticos integrados e otimizados (*toolboxes*) e facilidades para a visualização de resultados (e.g. gráficos e tabelas) e integração com planilhas eletrônicas (e.g. Excel). De particular importância dentre estes métodos, para a análise de redes elétricas, são os de transformação tempo-frequência (e.g. FFT - *Fast Fourier Transform*), de quadratura numérica (e.g. Gauss-Legendre) e de álgebra linear numérica (e.g. fatorações LU, QR e QZ, autovalores e autovetores, valores singulares e mínimos quadrados). Outro recurso matemático disponível e de grande importância, por exemplo, para o cálculo de matrizes formadas por derivadas parciais (e.g. Jacobianas e Hessianas) é o cálculo simbólico envolvendo funções analíticas. Além destes, o SIMULINK é outro recurso importante para simulação rápida de circuitos elétricos, sistemas de controle, sistemas contendo equipamentos de eletrônica de potência, dentre outros.

Apesar das vantagens citadas, o MATLAB apresenta um custo de licença de uso relativamente alto e que aumenta na medida em que se incluem mais *toolboxes* no pacote licenciado.

Por outro lado, existem outras linguagens e ambientes de programação disponíveis atualmente que podem ser utilizadas para os mesmos fins de prototipação para sistemas de potência, como: Python, Julia, Octave, Scilab e Mathematica.

As quatro primeiras ferramentas são gratuitas e de código fonte aberto (*open source*), enquanto a última é paga, a exemplo do Matlab. Entre estas, a linguagem que vem apresentando o maior crescimento de sua comunidade de usuários é o Python. Um dos principais motivos para isto é a grande quantidade de métodos matemáticos integrados (*Python Packages*) disponíveis. Outra característica importante do Python é sua rápida curva de aprendizagem, o que facilita bastante sua eventual adoção em substituição à uma determinada linguagem de prototipação.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é apresentar comparações entre Matlab e Python, objetivando analisar suas precisões em cálculos comumente utilizados em protótipos para sistemas elétricos de potência, como aqueles já citados. Também será apresentada a visão crítica dos autores em relação às facilidades oferecidas pelas ferramentas, como ambientes de programação, editores de texto do código-fonte, funções para traçado de gráficos (histogramas, nuvem de pontos, curvas, etc.) e depuradores de erros (*debug*).

Adicionalmente, será avaliada a possibilidade de se estender o uso da linguagem Python, não apenas como ferramenta de prototipação, mas também para desenvolvimento de versões comerciais. Neste contexto, será explorada a capacidade de compilação (transformação do código fonte em linguagem de máquina).

## 2 | MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A SISTEMAS DE POTÊNCIA

A seguir serão apresentados, de maneira resumida, os principais cálculos aplicados

a sistemas elétricos de potência em abordagens numéricas computacionais.

## 2.1 Transformações Tempo-Frequência

### 2.1.1 Transformada de Laplace

A transformada de Laplace (Poularikas and Seely 2010) é definida por uma integral imprópria que permite reduzir a complexidade do processo de análise do comportamento de um sistema de potência, pois converte equações diferenciais em equações algébricas e convolução de funções em meros produtos das mesmas. Este operador linear é amplamente utilizado na teoria de controle de sistemas de potência quando representados por funções de transferência (Ogata 2010). Esta transformada também é utilizada em análises de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência (Moreno and Ramirez 2008).

### 2.1.2 Transformada Discreta de Fourier

A transformada de Fourier de tempo discreto (DTFT) aplica-se a funções discretas (Oppenheim and Schaffer 1998). Quando tal função é periódica, tem-se um caso particular que é a Transformada Discreta de Fourier (DFT). Um dos algoritmos mais eficientes para o cálculo computacional da DFT (Cooley and Tukey 1965) é conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

Embora a análise de Fourier seja muito utilizada em processamento de sinais, existem análises de sistemas de potência que a utilizam como, por exemplo, a avaliação de harmônicos (Mayoral et al. 2017), (Rehman et al. 2015) Fast Fourier Transform (FFT, (Liu et al. 2011).

## 2.2 Quadratura Numérica

A quadratura (ou integração) numérica aproxima, dentro de um intervalo, a integral de funções reais ou complexas. Existem vários métodos possíveis para o cálculo da quadratura de uma função como, por exemplo, Newton-Cotes, Gauss-Legendre, Gauss-Kronrod, Gauss-Tchebycheff, Romberg, dentre outras (Ames and Brezinski 1993).

## 2.3 Álgebra Linear Numérica

### 2.3.1 Autovalores e Autovetores

Um escalar  $\lambda \in \mathbb{C}$  é um autovalor de uma matriz  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  se existe um vetor  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^n$  não nulo tal que  $\mathbf{Ax} = \lambda\mathbf{x}$ . Os vetores  $\mathbf{x}$  que satisfazem a igualdade anterior são chamados de autovetores (à direita) de  $\mathbf{A}$  associados ao autovalor  $\lambda$ . Outro ponto importante é que a matriz  $\mathbf{A}$  é invertível (ou não-singular) se  $\det(\mathbf{A}) \neq \mathbf{0}$ . Na modelagem dos sistemas de controle, o cálculo dos autovalores é fundamental tanto na avaliação da estabilidade do sistema de potência estudado quanto no projeto de compensadores ou controladores (Ogata 2010) através, por exemplo, dos diagramas de lugar-das-raízes e das técnicas de

realocação de polos para melhora do desempenho dinâmico do sistema.

Os autovetores são úteis, por exemplo, na obtenção de matrizes de mudança de base que determinam as formas controláveis e observáveis do sistema modelado em espaço de estados (Kundur 2017). Os autovetores também têm uma relação direta de ponderação das parcelas das respostas no tempo. Na modelagem da dinâmica de sistemas de potência por espaço de estados ou por sistemas descritores (Daniel et al. 2013).

### 2.3.2 Matriz Inversa e Matriz Pseudo-Inversa

Uma matriz quadrada  $\mathbf{A}$  é dita invertível se existe uma matriz  $\mathbf{A}^{-1}$  tal que  $\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{I}$ , onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade de mesma dimensão de  $\mathbf{A}$  (Hoffmann and Kunze 1971). Uma das formas mais comuns e eficientes de cálculo da matriz inversa é a eliminação de Gauss-Jordan, baseada na fatoração  $\mathbf{LU}$  (ver subitem a seguir) (Strang 2013). Deve-se observar que não é eficiente numericamente resolver um sistema de equações lineares  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  por meio da inversão explícita da matriz  $\mathbf{A}$ . Ao invés disto, deve-se transformar o sistema original em dois sistemas triangulares:  $\mathbf{Lc} = \mathbf{b}$  e  $\mathbf{Ux} = \mathbf{c}$ , onde  $\mathbf{A} = \mathbf{LU}$ . Portanto, a inversão numérica de matrizes não tem muitas aplicações práticas em sistemas de potência, embora possua grande importância teórica e conceitual.

Uma possível generalização da matriz inversa (Penrose 1955) para matrizes retangulares é a matriz  $\mathbf{A}^{\dagger}$  chamada de matriz pseudo-inversa (ou inversa de Moore-Penrose). Uma das maneiras de obter a matriz  $\mathbf{A}^{\dagger}$ , a partir da matriz  $\mathbf{A}$ , é a através de uma decomposição em valores singulares (Trefethen and Bau 1997), (Lord et al. 1999) (Lord et al. 1999)(SVD - *Singular Value Decomposition*), a qual será mencionada mais adiante. De maneira geral, a utilidade desta matriz pseudo-inversa é produzir uma solução de mínimos quadrados (Björck 1996) para um sistema sobredeterminado (mais equações do que incógnitas) de equações lineares. A solução de mínimos quadrados é empregada no método de Ajuste Vetorial (*Vector Fittingem* inglês) (Bjørn Gustavsen and Semlyen 1999). Este método é amplamente utilizado pelos engenheiros de sistemas de potência para a construção de equivalentes de redes elétricas dependentes da frequência (Campello et al. 2020), (Bjorn Gustavsen and De Silva 2013) e modelos de linhas de transmissão (Bjorn Gustavsen 2017), (Bjørn Gustavsen 2006), (Bjørn Gustavsen and Nordstrom 2008) e transformadores (Bjorn Gustavsen 2016), (Bjørn Gustavsen 2003), (Bjørn Gustavsen 2010), entre outras aplicações. Estes equivalentes e modelos são fundamentais para a análise precisa e confiável de transitórios eletromagnéticos.

### 2.3.3 Fatoração LU

A fatoração ou decomposição LU (*Lower/Upper*) é uma forma de escrever uma matriz  $\mathbf{A}$  não-singular como o produto de duas matrizes triangulares: uma inferior  $\mathbf{L}$  e outra superior  $\mathbf{U}$ . Com estes fatores é possível transformar o sistema original  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  em dois

sistemas triangulares dados por  $\mathbf{Lc} = \mathbf{b}$  e  $\mathbf{Ux} = \mathbf{c}$ . Esta transformação é uma das formas mais eficientes de solução numérica de sistemas de equações lineares (Strang 2013). Esta fatoração possui diversas aplicações em sistemas elétricos de potência, como cálculo de respostas em frequência e análise de contingências (Varricchio, Costa, and Véliz 2015) em estudos de comportamento harmônico, cálculo de respostas no tempo na análise de transitórios eletromecânicos (Daniel et al. 2017) e eletromagnéticos (Daniel et al. 2019), (Daniel 2018).

### 2.3.4 Decomposições QR, QZ e Valores Singulares

A decomposição ou fatoração QR (Lord et al. 1999) permite escrever uma matriz  $\mathbf{A}$  como o produto de uma matriz ortogonal  $\mathbf{Q}$  por uma matriz triangular superior  $\mathbf{R}$ , usada frequentemente na solução de problemas de mínimos quadrados linear. Também é a base para um método bastante consagrado de cálculo computacional de autovalores chamado de Algoritmo QR. Na modelagem de sistemas de potência por equações de estados, este algoritmo permite o cálculo simultâneo de todos os polos do sistema, resíduos associados e zeros de FTs. Estes polos e resíduos são utilizados na análise de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência (Kundur 2017). Na modelagem de sistemas de potência por sistemas descritores (Freitas et al. 2011), (Varricchio and Gomes Jr 2018) a decomposição QZ (Moler and Stewart 1973) é útil no cálculo simultâneo de todos os seus polos, resíduos associados e zeros de FTs. Como já mencionado no subitem 2.3.1, o desempenho harmônico do sistema pode ser melhorado pelo deslocamento apropriado destes polos e zeros no plano complexo (Varricchio and Gomes Jr 2018), (Varricchio et al. 2003).

A SVD (Trefethen and Bau 1997), (Lord et al. 1999), (Horn and Johnson 2012) é útil no cálculo da pseudo-inversa, no ajuste (*fitting*) de funções por mínimos quadrados, na aproximação de matrizes, e na determinação do posto, imagem e núcleo de uma determinada matriz. Esta decomposição é utilizada, dentre outras aplicações, no *Square Root Balanced Truncation Method* para a construção eficiente de modelos reduzidos de sistemas de potência (Varricchio, Freitas, and Martins 2015), (Schilders et al. 2008).

### 2.3.5 Jacobiana e Hessiana

Seja  $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  uma função com domínio  $n$ -dimensional e imagem  $m$ -dimensional, definida por um vetor de  $m$  componentes, onde cada componente é uma outra função  $F_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  cujas derivadas parciais podem ser organizadas em uma matriz  $m \times n$  que é chamada de matriz Jacobiana (Sauer and Pai 1990). A matriz Hessiana de uma determinada função de  $n$  variáveis é uma matriz quadrada de dimensão  $n \times n$  composta pelas derivadas parciais de segunda ordem da função, sendo útil na descrição da curvatura local da função. Em sistemas de potência, estas matrizes são utilizadas na solução do problema de fluxo de

potência ótimo (Sasson et al. 1973).

### 3 I COMPARAÇÕES MATLAB VERSUS PYTHON

A seguir serão apresentadas as comparações entre Matlab e Python para alguns cálculos e algoritmos úteis na análise de sistemas de potência.

#### 3.1 Autovalores

Para calcular os autovalores de uma matriz com o Python, utilizou-se o pacote “NumPy” (Klein 2014), o qual suporta a utilização de vetores e matrizes multidimensionais, possuindo uma grande quantidade e variedade de funções matemáticas para se trabalhar com tais estruturas. Inicialmente, criou-se no Python uma matriz randômica de dimensão utilizando-se a função “random.rand” e, em seguida, calculou-se os autovalores com a função “linalg.eigvals”. A mesma matriz foi utilizada no Matlab para calcular os autovalores através da função “eig”. Na Figura 1 está apresentado o resultado da comparação no plano complexo, onde verifica-se que houve elevado grau de coincidência entre os resultados. Os erros percentuais obtidos para cada autovalor estão mostrados na Figura 2. Este erro é dado por:

$$\epsilon = \left| \frac{\lambda^{Matlab} - \lambda^{Python}}{\lambda^{Matlab}} \right| 100\% \quad (1)$$

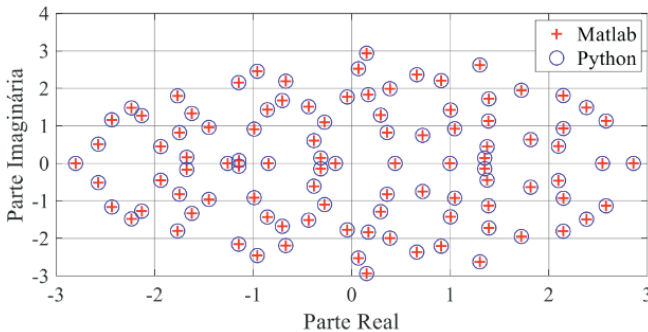


Figura 1 – Comparação de cálculo de autovalores.

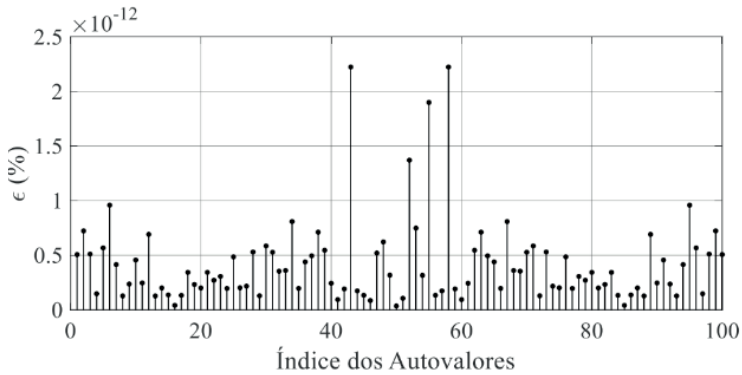


Figura 2 – Erro entre os cálculos de autovalores.

Objetivando verificar a propagação do acúmulo dos erros de arredondamento, inerentes aos processos numéricos, foi realizada a mesma comparação anterior, porém para uma matriz randômica de dimensões . Neste caso, o maior erro encontrado foi de  $2,24 \times 10^{-11}$ %.

### 3.2 Fatoração LU

Para comparar o cálculo da fatoração LU realizado no Python e no Matlab, criou-se um código no Python que gera uma matriz **A** randômica, calcula as matrizes **L** (*Lower*) e **U** (*Upper*), utilizando a função “scipy.linalg.lu”, e exporta estas matrizes para um arquivo no formato “MAT-file” (padrão de importação/exportação de variáveis do Matlab). O pacote utilizado “SciPy” possui um grande conjunto de ferramentas, como algoritmos de integração numérica, otimização, interpolação, transformadas, estatística, dentre outras. Em seguida, a mesma matriz **A** foi utilizada no Matlab e calculada a fatoração LU através do comando “lu”. Os máximos erros percentual obtidos para cada uma das matrizes triangulares foram calculados conforme (2) e (3).

$$\epsilon_L = \frac{\max\{|\mathbf{L}^{Matlab} - \mathbf{L}^{Python}|\}}{|\mathbf{L}_{i,j}^{Matlab}|} = 2,95 \times 10^{-12} \% \quad (2)$$

$$\epsilon_U = \frac{\max\{|\mathbf{U}^{Matlab} - \mathbf{U}^{Python}|\}}{|\mathbf{U}_{m,n}^{Matlab}|} = 6,3 \times 10^{-13} \% \quad (3)$$

Onde  $(i, j) = (97,96)$  representa a posição (linha, coluna) do elemento  $\mathbf{L}_{i,j}$  onde se obteve a maior diferença entre os resultados do Matlab e do Python no cálculo da matriz **L**. Esta posição está mostrada na Figura 3 (ponto de interseção entre as retas horizontal e vertical). Analogamente,  $(m, n) = (84,93)$  representa a posição (linha, coluna) do elemento  $\mathbf{U}_{m,n}$  onde se obteve a maior diferença entre os resultados do Matlab e do Python no

cálculo da matriz **U**. Esta posição está mostrada na Figura 4 (ponto de interseção entre as retas horizontal e vertical).

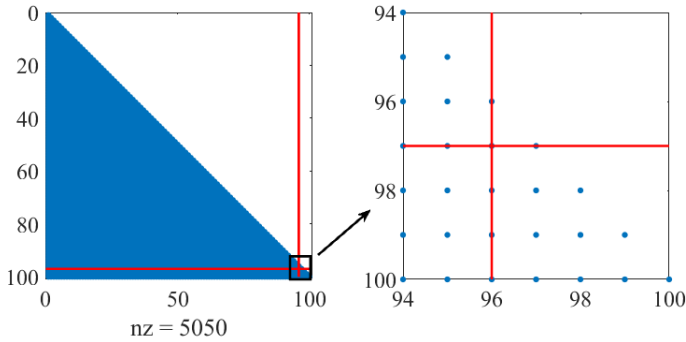


Figura 3 – Posição relativa ao máximo erro na matriz **L**.

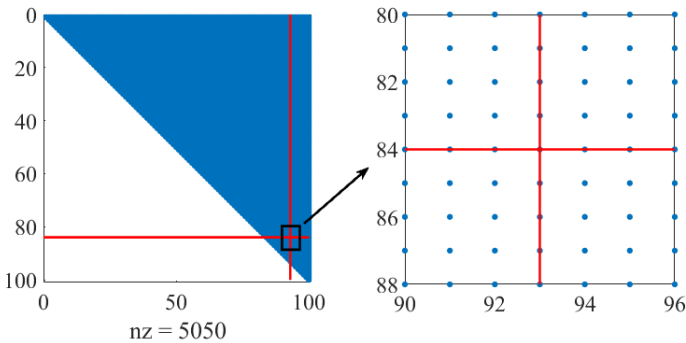


Figura 4 – Posição relativa ao máximo erro na matriz **U**.

### 3.3 Matemática Simbólica

No Matlab é possível realizar diversas operações com variáveis e funções simbólicas através do objeto “sym”. No Python também é possível utilizar matemática simbólica através da biblioteca “SymPy” (Meurer et al. 2017). Através da mesma, é possível fazer desde aritmética básica até cálculos mais avançados como limites, derivadas, integrais, solução de equações polinomiais, algébricas e diferenciais. A seguir, é apresentado um exemplo do cálculo de uma equação diferencial no modo interativo do Python usando símbolos:



```

1 >>> from sympy import Symbol, Function, Eq, dsolve, sin, diff
2 >>> x = Symbol("x")
3 >>> f = Function("f")
4 >>> eq = Eq(x**2*f(x).diff(x), -3*x*f(x) + sin(x)/x)
5 >>> eq
6      2      d      sin(x)
7      x  ·  —(f(x)) = -3·x·f(x) +  —
8      dx
9 >>>
10 >>> dsolve(eq, f(x))
11      C1 - cos(x)
12 f(x) = —————
13          3
14         x

```

### 3.4 Quadratura Numérica

Para exemplificar o cálculo de integração numérica, seja a seguinte função gaussiana:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \mid x \in \mathbb{R} \quad (4)$$

Utilizando-se o método de quadratura Gauss-Kronrod (Laurie 1997) no Matlab, através da função “quadgk”, para calcular a área sob a curva de  $f'(x)$  no intervalo  $0 \leq x \leq 1$ , obtém-se o valor 0.421350396474857 (com erro absoluto de  $2.11636 \times 10^{-17}$ ). Utilizando-se o método de quadratura Gauss-Legendre (Golub and Welsch 1969) no Python, através da função “scipy.integrate.quadrature”, para calcular a mesma área anterior, obtém-se 0.421350396518711 (com erro absoluto de  $3.45505 \times 10^{-9}$ ).

### 3.5 Decomposição em Valores Singulares

Para exemplificar a SVD utilizou-se no Matlab a função “svd” e no Python a “numpy.linalg.svd” aplicada a uma matriz randômica de dimensão . Os resultados de ambos os programas foram praticamente os mesmos. Os erros entre os cálculos dos valores singulares estão mostrados na Figura 5. Estes erros foram calculados utilizando equação análoga a (1).

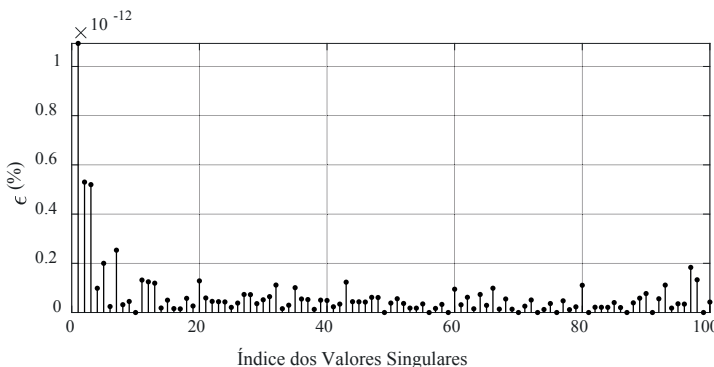


Figura 5 – Erros entre os cálculos dos valores singulares.

### 3.6 Transformada Rápida de Fourier

Seja a função  $v(t)$  do tempo ( $t \in \mathbb{R}$ ) definida em (5), que pode representar, por exemplo, uma tensão com frequência fundamental de 60 Hz ( $\omega = 2\pi 60$  rad/s). A função  $v_h(t)$ , definida em (6), representa as componentes harmônicas de  $v(t)$ , mostrada na Figura 6.

$$v(t) = \text{sen}(\omega t) + v_h(t) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} v_h(t) = & 0.05\text{sen}(3\omega t) + 0.045\text{sen}(6\omega t) \\ & + 0.04\text{sen}(7\omega t) + 0.044\text{sen}(11\omega t) \\ & + 0.035\text{sen}(18\omega t) + 0.025\text{sen}(24\omega t) \quad (6) \\ & + 0.01\text{sen}(100\omega t) + 0.007\text{sen}(200\omega t) \\ & + 0.003\text{sen}(300\omega t) \end{aligned}$$

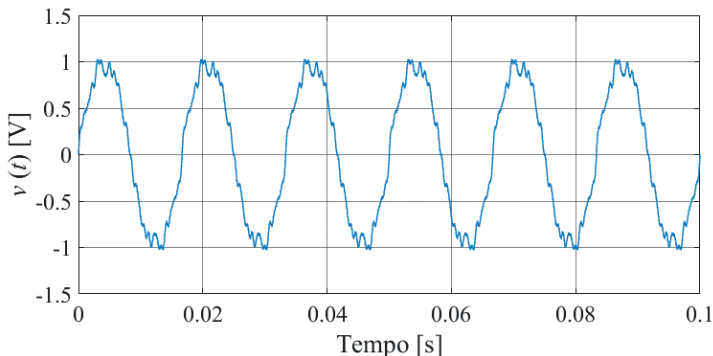


Figura 6 – Forma de onda da tensão  $v(t)$ .

Na Figura 7 é apresentada a comparação dos resultados obtidos no cálculo da FFT de  $v(t)$  (função “fft” no Matlab e função “numpy.fft.fft” no Python). As curvas são visualmente coincidentes e o maior erro relativo encontrado foi de  $5.0349 \times 10^{-6}\%$ .

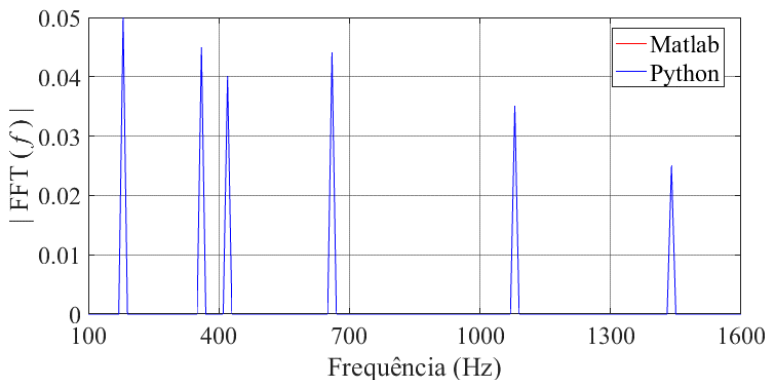


Figura 7 – Conteúdo harmônico predominante de  $v(t)$ .

### 3.7 Simulink, PyPSA e Pandapower

O Simulink é uma ferramenta integrada ao Matlab bastante útil para modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos, incluindo os sistemas de potência (Kulkarni and Chile 2011), (Dessaint et al. 1999). Sua interface é baseada em diagramas de blocos. Este simulador pode ser aplicado tanto para sistemas lineares como não-lineares. As equações algébricas e diferenciais, que descrevem o comportamento dos sistemas a partir dos blocos no Simulink, são solucionadas no domínio do tempo através de alguns métodos de integração disponíveis como o trapezoidal, Euler, Runge-Kutta, dentre outros. O Matlab também possui uma *toolbox* específica para simulação de sistemas de potência, com diversos modelos e recursos disponíveis.

O PyPSA (Brown et al. 2018) é uma *toolbox* gratuita para simulação e otimização de sistemas de potência, que inclui recursos como modelos de unidades geradoras convencionais, de geração eólica e solar, de unidades de armazenamento e acoplamento com planejamento energético e redes mistas de corrente alternada e contínua. O PyPSA foi projetado trabalhar com redes de grande porte e longas séries temporais.

O Pandapower é uma ferramenta baseada em Python para análise e otimização de sistemas de potência balanceados. Ele permite análises de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, estimação de estados e curto-circuito. Ele inclui uma solução de fluxo de potência baseada no método de Newton-Raphson, que utiliza compilação *just-in-time*, para melhorar o desempenho computacional.

## 4 | RECURSOS GRÁFICOS E DEPURAÇÃO DE ERROS

O Matlab tem um depurador de erros integrado em seu editor de códigos. Alternativamente, também é possível utilizar as funções de depuração como “dbstack”, “dbstepin”, “dbcont”, “dbstepou” e “dbquit”. O Python também permite utilização de diversos depuradores através das diversas IDEs (*Integrated Development Environment*) disponíveis

em código aberto.

Com relação aos recursos gráficos e de plotagem de resultados, o Matlab possui diversas funções integradas de traçado em duas ou três dimensões (pontos, curvas, superfícies, histogramas, etc.). O Python possui uma importante biblioteca de traçado de gráficos, chamada “matplotlib”, que disponibiliza uma grande variedade de gráficos semelhantes àqueles oferecidos pelo Matlab. Além desta, o Python também possui muitas outras bibliotecas alternativas para este fim como, por exemplo, “Pyplot” e “Pylab”.

## 5 | INTERPRETAÇÃO VERSUS COMPILAÇÃO

Tanto o Python como o Matlab são linguagens de programação interpretadas, ou seja, existe um interpretador que não converte todo o código para linguagem de máquina antes de executá-lo. Ao invés disto, ele executa sequencialmente cada instrução. Ambos, Python e Matlab, permitem a utilização da técnica *Just In Time Compiling*, que resulta numa melhora significativa de performance. Também é possível compilar um código Python gerando um único arquivo executável com o “pyinstaller”, “py\_compiler”, “Py2Exe”, “cx\_Freeze”, dentre outros. Com relação ao Matlab, é também possível compilar o código fonte utilizando o comando “mcc”.

## 6 | CONCLUSÕES

Assim como o Matlab, o Python é uma linguagem com considerável maturidade, pois já existe há três décadas. Além disso, uma de suas maiores atrações é o fato de possuir elevada quantidade de pacotes criados por sua grande e dedicada comunidade de milhões de usuários. O Python também tem se tornado mais eficiente computacionalmente devido a melhorias obtidas no processamento e paralelismo. Tanto o Python quanto o Matlab suportam técnicas de programação orientada a objetos, o que pode facilitar e tornar mais intuitiva a elaboração das estruturas de dados da rede elétrica e oferecer uma melhor gestão de projetos de maior porte. Além disso, ambas linguagens, originalmente interpretadas, permitem facilmente a compilação de códigos fontes para geração de arquivos executáveis (linguagem de máquina). Um grande atrativo do Python é a gratuidade de suas licenças, enquanto as do Matlab são pagas e relativamente caras, fator importante a ser considerado na escolha da ferramenta de prototipação. Embora diversos fóruns na internet sobre o Python contenham comparações com o Matlab sob vários aspectos, neste artigo deu-se maior atenção aos mais pertinentes à prototipação de ferramentas para análise de sistemas elétricos de potência. Os resultados apresentados indicam o Python como alternativa viável ao Matlab. Ressalta-se, contudo, que estes resultados são preliminares e, portanto, julga-se que sejam necessários mais testes envolvendo problemas reais de sistemas de potência, considerando não apenas a precisão como também o tempo de CPU. Ressalta-se, contudo, que linguagens de alto nível do tipo Python e Matlab, que

possuem diversos recursos matemáticos e gráficos, são extremamente importantes para acelerar o desenvolvimento inicial (protótipo) de métodos, modelos, algoritmos e provas de conceito para sistemas elétricos de potência e equipamentos associados.

## REFERÊNCIAS

Ames, W. F., & Brezinski, C. (1993). Numerical recipes in Fortran (The art of scientific computing). *Mathematics and Computers in Simulation*. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(93\)90043-t](https://doi.org/10.1016/0378-4754(93)90043-t)

Björck, Å. (1996). *Numerical Methods for Least Squares Problems. Numerical Methods for Least Squares Problems*. <https://doi.org/10.1137/1.9781611971484>

Brown, T., Hörsch, J., & Schlachtberger, D. (2018). PyPSA: Python for power system analysis. *Journal of Open Research Software*, 6(1). <https://doi.org/10.5334/jors.188>

Campello, T. M., Varricchio, S. L., & Taranto, G. N. (2020). Representation of multiport rational models in an electromagnetic transients program: Networks with lumped and distributed parameters. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106029>

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*. <https://doi.org/10.2307/2003354>

Daniel, L. O. (2018, June 29). *Electromagnetic Transient Simulator Using Dynamic Phasors for Non-Linear Analysis of Electrical Networks with FACTS Equipment*. PhD Thesis, COPPE/UFRJ.

Daniel, L. O., & Gomes Jr, S. (2017, October 22). Amortecimento de Modos Eletromecânicos Utilizando Estabilizadores em Elos HVDC Considerando-se Diferentes Estratégias de Controle. *XXIV SNPTEE, Curitiba - PR*.

Daniel, L. O., Gomes Jr, S., Grander, L., & Lirio, F. L. (2013, October 1). Small Signal Analysis of HVDC Systems Using Computational Program PacDyn. *Colloquium CIGRE, Brasilia-DF*.

Daniel, L. O., Gomes Jr, S., & Watanabe, E. H. (2017, May 21). Utilização de Fasores Dinâmicos para Modelagem de Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos. *XVII ERIAC, Ciudad del Este, Paraguay*.

Daniel, L. O., Gomes Jr, S., & Watanabe, E. H. (2019, June 21). Novo Simulador de Transitórios Eletromagnéticos Baseado em Fasores Dinâmicos. *XVIII ERIAC, Foz do Iguçu - PR*.

Dessaint, L. A., Al-Haddad, K., Le-Huy, H., Sybille, G., & Brunelle, P. (1999). A power system simulation tool based on simulink. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(6), 1252–1254. <https://doi.org/10.1109/41.808019>

Freitas, F. D., Martins, N., Varricchio, S. L., Rommes, J., & Veliz, F. C. (2011). Reduced-order transfer matrices from RLC network descriptor models of electric power grids. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2136442>

Golub, G. H., & Welsch, J. H. (1969). Calculation of Gauss quadrature rules. *Mathematics of Computation*. <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-69-99647-1>

- Gómez, P., & Uribe, F. (2009). The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems - INT J ELEC POWER ENERG SYST*, 31, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.10.006>
- Granville, S. (1994). Optimal reactive dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/59.317548>
- Gustavsen, Bjørn. (2016). Wideband Transformer Modeling Including Core Nonlinear Effects. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2440446>
- Gustavsen, Bjørn. (2017). Optimal Time Delay Extraction for Transmission Line Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2609039>
- Gustavsen, Bjørn. (2003). Application of vector fitting to high frequency transformer modeling. *Measurements*, 3, 4. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.95.9606&rep=rep1&type=pdf>
- Gustavsen, Bjørn. (2006). Improving the pole relocating properties of vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.860281>
- Gustavsen, Bjørn. (2010). A hybrid measurement approach for wideband characterization and modeling of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2043747>
- Gustavsen, Bjørn, & De Silva, H. M. J. (2013). Inclusion of rational models in an electromagnetic transients program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-parameters, transfer functions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2247067>
- Gustavsen, Bjørn, & Nordstrom, J. (2008). Pole identification for the universal line model based on trace fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911186>
- Gustavsen, Bjørn, & Semlyen, A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/61.772353>
- Hoffmann, K., & Kunze, R. (1971). Linear Algebra Second edition. *Mathematics of Computation*, 15(75), 407. <http://www.jstor.org/stable/2002915?origin=crossref>
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (2012). *Matrix Analysis. Matrix Analysis*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139020411>
- Klein, B. (2014). NumPy. In *Einführung in Python 3*. <https://doi.org/10.3139/9783446441514.031>
- Kulkarni, S. B., & Chile, R. H. (2011). MATLAB / SIMULINK Simulation Tool for Power Systems. *International Journal of Power System Operation and Energy Management*, 1(2), 33–38.
- Kundur, P. S. (2017). Power system dynamics and stability. In *Power System Stability and Control, Third Edition*. <https://doi.org/10.4324/b12113>

- Kythe, P. K., & Schäferkötter, M. R. (2004). *Handbook of computational methods for integration. Handbook of Computational Methods for Integration*. <https://doi.org/10.1201/9780203490303>
- Laurie, D. P. (1997). Calculation of Gauss-Kronrod quadrature rules. *Mathematics of Computation*. <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-97-00861-2>
- Liu, Y., Jiang, B., Wang, C., & Geng, S. (2011). Power system harmonic analysis based on windowed FFT and wavelet transform. In *DRPT 2011 - 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5993893>
- Lord, N., Golub, G. H., & Loan, C. F. Van. (1999). Matrix Computations. *The Mathematical Gazette*. <https://doi.org/10.2307/3621013>
- Mayoral, E. H., López, M. A. H., Hernández, E. R., Marrero, H. J. C., Portela, J. R. D., & Oliva, V. I. M. (2017). Fourier Analysis for Harmonic Signals in Electrical Power Systems. *Fourier Transforms - High-tech Application and Current Trends*, (September). <https://doi.org/10.5772/66733>
- Meurer, A., Smith, C. P., Paprocki, M., Čertík, O., Kirpichev, S. B., Rocklin, M., et al. (2017). SymPy: Symbolic computing in python. *PeerJ Computer Science*. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.103>
- Moler, C. B., & Stewart, G. W. (1973). An Algorithm for Generalized Matrix Eigenvalue Problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. <https://doi.org/10.1137/0710024>
- Moreno, P., & Ramirez, A. (2008). Implementation of the numerical Laplace transform: A review. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.923404>
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno. Control Engineering*.
- Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (1998). *Discrete Time Signal Processing 2nd Edition. Book*.
- Penrose, R. (1955). A generalized inverse for matrices. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. <https://doi.org/10.1017/S0305004100030401>
- Poularikas, A. D., & Seely, S. (2010). Laplace transforms. In *Transforms and Applications Handbook, Third Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781420066531>
- Rehman, B., Ahmad, M., & Hussain, J. (2015). Analysis of power system harmonics using singular value decomposition, least square estimation and FFT. In *2014 International Conference on Energy Systems and Policies, ICESP 2014*. <https://doi.org/10.1109/ICESP.2014.7346973>
- Sasson, A. M., Vilorio, F., & Aboites, F. (1973). Optimal load flow solution using the Hessian matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293590>
- Sauer, P. W., & Pai, M. A. (1990). Power system steady-state stability and the load-flow jacobian. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/59.99389>
- Schilders, W. H. a, Vorst, H. a Van Der, & Rommes, J. (2008). *Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications. Methods*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78841-6>

- Segundo-Ramirez, J., Bayo-Salas, A., Esparza, M., Beerten, J., & Gómez, P. (2020). Frequency Domain Methods for Accuracy Assessment of Wideband Models in Electromagnetic Transient Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(1), 71–83. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2927171>
- Strang, G. (2013). Linear Algebra and its applications fourth edition. *Pressure Vessel Design Manual*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387000-1.01001-9>
- Trefethen, L. N., & Bau, D. (1997). *Numerical Linear Algebra*. *Numerical Linear Algebra*. <https://doi.org/10.1137/1.9780898719574>
- Varricchio, S. L., Costa, C., & Véliz, F. C. (2015, October 18). Método de Alto Desempenho Computacional para Estudos de Impacto Harmônico de Novos Acessantes à Rede Básica. *XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu - PR*.
- Varricchio, S. L., Freitas, F. D., & Martins, N. (2015). Hybrid modal-balanced truncation method based on power system transfer function energy concepts. *IET Generation, Transmission and Distribution*. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1116>
- Varricchio, S. L., Freitas, F. D., Martins, N., & Veliz, F. C. (2015). Computation of dominant poles and residue matrices for multivariable transfer functions of infinite power system models. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2336243>
- Varricchio, S. L., & Gomes Jr, S. (2018). Electrical network dynamic models with application to modal analysis of harmonics. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2017.09.016>
- Varricchio, S. L., Martins, N., & Lima, L. T. G. (2003). A Newton-Raphson method based on eigenvalue sensitivities to improve harmonic voltage performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.806682>



## 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