

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 Cremona

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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^ª Dr^ª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof^ª Dr^ª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^ª Dr^ª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

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

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof^ª Dr^ª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^ª Dr^ª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^ª Dr^ª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof^ª Dr^ª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª 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^ª Dr^ª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^ª Dr^ª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof^ª Dr^ª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof^ª Dr^ª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª 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^ª 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^ª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Ma. Lilians Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª 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^ª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Prof^ª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª 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^ª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof^ª Dr^ª 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^ª 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^ª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Prof^ª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof^ª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Prof^ª 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^a Dr^a 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
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

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

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 22 | 298 |
| TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA | |
| Marcelo Nogueira Tirolli | |
| Alexandre Borges Marcelo | |
| Flávio Alessandro Serrão Gonçalves | |
| DOI 10.22533/at.ed.73421220222 | |
| CAPÍTULO 23 | 312 |
| A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS | |
| 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 | |
| DOI 10.22533/at.ed.73421220223 | |
| CAPÍTULO 24 | 325 |
| LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO | |
| 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 | |
| DOI 10.22533/at.ed.73421220224 | |
| SOBRE OS ORGANIZADORES | 343 |
| ÍNDICE REMISSIVO | 344 |

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

Data de aceite: 04/02/2021

Data da submissão: 20/12/2020

Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/9465411495928667>

Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

Antônio Carlos Duarte Ricciotti

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

Adailton Braga Júnior

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/5914795787360469>

Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

Júlio César Ribeiro

Fundação Universidade Federal de Rondônia,
Departamento de Engenharia Elétrica
Porto Velho - RO
<http://lattes.cnpq.br/9307581340965790>

RESUMO: O setor elétrico tem passado por uma reestruturação nos últimos anos, especialmente nas últimas duas décadas diversas mudanças como o crescimento da geração distribuída e os avanços da eletrônica de potência tem desempenhado um papel cada vez mais importante em termos técnicos e comerciais no sistema elétrico de potência (SEP). As mudanças no setor elétrico associadas à necessidade de se obter elevados índices de continuidade de fornecimento e qualidade de energia (QE) levam ao desenvolvimento de sistemas capazes de detectar e classificar faltas no sistema elétrico, com o objetivo de monitorar e reestabelecer o fornecimento de forma eficiente e segura. O objetivo deste artigo é demonstrar um método de detecção e classificação de curto-circuitos baseado em processamento de sinais e inteligência computacional. Para o pré-processamento dos sinais foi utilizada a transformada discreta fracionária de Fourier (DFrFT), que consiste em uma generalização da transformada discreta de Fourier e permite a existência de domínios intermediários entre o tempo e a frequência. Utilizando a DFrFT em conjunto com uma rede neural artificial (RNA) *multilayer perceptron* foi possível obter um sistema com taxa de acurácia acima de 90% para detecção e classificação de curto-circuitos.

PALAVRAS - CHAVE: Classificação, curto-circuito, rede neural artificial, transformada discreta fracionária de Fourier

DETECTION AND CLASSIFICATION OF SHORT-CIRCUITS USING THE DISCRETE FRACTIONAL FOURIER TRANSFORM AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

ABSTRACT: The electrical sector has experienced a specialty in the years, especially in the last two decades, several changes such as the growth of distributed generation and the advances in power electronics have played an increasingly important role in technical and commercial terms in the electrical power system (SEP). As changes in the electrical sector associated with the need to obtain high rates of continuity of supply and quality of energy (QE) lead to the development of systems to detect and classify faults in the electrical system, with the objective of monitoring and reestablishing supply efficient and safe. The purpose of this article is to demonstrate a method for detecting and classifying short circuits based on signal processing and computational intelligence. For the pre-processing of the signals, the discrete Fourier transform (DFrFT) was used, which consists of a generalization of the discrete Fourier transform and allows the existence of intermediate domains between time and frequency. Using a DFrFT in conjunction with a multilayer perceptron artificial neural network (RNA) it was possible to obtain a system with an accuracy rate above 90% for detecting and classifying short circuits.

KEYWORDS: Artificial Neural Network, Classification, Fractional Fourier Transform, Short-Circuit.

1 | INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia elétrica levou a uma reformulação das estruturas comercial e técnica do sistema elétrico de potência (SEP) nos últimos anos. A qualidade de energia elétrica se tornou um objeto de estudo cada vez mais importante do setor, pois está relacionada diretamente a competitividade do mercado e aos aspectos técnicos dos serviços oferecidos pelos agentes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Sobretudo nas últimas duas décadas, o setor energético brasileiro passou por mudanças como a diversificação da natureza das cargas, a incorporação de sistemas de transmissão em corrente contínua e o aumento do número de geradores distribuídos conectados ao sistema (VIEIRA JR, 2011).

O impacto de tais mudanças no setor energético motivou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a publicar os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), um conjunto de normas e diretrizes que norteiam as ações dos agentes do setor elétrico, frente ao novo cenário do sistema. No módulo 8, o PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (ANEEL, 2016).

O conceito de qualidade de energia está relacionado diretamente a distúrbios que causam alterações nos parâmetros do sistema elétrico, situações que degradam a qualidade de energia podem estar relacionadas a afundamentos de tensão, variações de corrente,

distorções harmônicas, transitórios impulsivos e outros problemas, (SUNDARABALAN; SELVI, 2015). Uma das faltas relacionadas a vários distúrbios do sistema elétrico de potência é o curto-circuito. Um curto-circuito caracteriza-se como um caminho fechado de baixíssima impedância em um circuito elétrico. Elevações de tensão, interrupções de tensão, distorções harmônicas e elevação de correntes são distúrbios que podem estar relacionados a ocorrência de curto-circuitos no SEP.

A necessidade da manutenção da qualidade de energia pressupõe que os distúrbios que a degradam sejam estudados e que sejam propostos novos métodos de análise e classificação das faltas no sistema elétrico. Uma das alternativas para a análise de faltas no SEP é empregar sistemas baseados em processamento de sinais e inteligência computacional (ANEESH, 2015; MOHANTY, 2014).

Em (ARAÚJO, 2011) os autores propõem um método baseado em redes neurais artificiais (neste artigo a sigla RNA será utilizada para designar redes neurais artificiais e rede neural artificial) especializadas que classificam distúrbios no SEP. Os resultados obtidos são satisfatórios com relação a classificação de elevações de tensão, transitórios impulsivos, afundamento de tensão e distorções harmônicas.

A utilização de RNA para a classificação de faltas também é demonstrada em (GHANIZADEH, GHAREHPETIAN, 2014), onde é apresentado um sistema capaz de determinar a origem de faltas nos enrolamentos de transformadores de potência. O sistema proposto é capaz de distinguir se as faltas são provenientes de defeitos mecânicos ou elétricos nos enrolamentos.

Em (LI, MONTI, 2014) é demonstrada a utilização da transformada *wavelet* em conjunto com RNA para a detecção e classificação de faltas em um gerador fotovoltaico de média tensão. A utilização da transformada *wavelet* em conjunto com RNA neste tipo de aplicação também é demonstrada em (VALTIERRA, 2013).

O objetivo deste artigo é apresentar um método de classificação de curto-circuito baseado em processamento de sinais, por meio da transformada fracionária de Fourier (FrFT - do inglês, *fractional Fourier transform*), e RNA. Na seção II é feita a discussão a respeito da FrFT e dos métodos utilizados para obter a sua versão discretizada. Na seção III é definido o problema em questão e na seção IV é descrita a metodologia. Na seção V são apresentados os resultados obtidos e, por fim, na seção VI são feitas as considerações finais do trabalho.

2 | A TRANSFORMADA FRACIONÁRIA DE FOURIER

A transformada fracionária de Fourier é o exemplo mais conhecido dentre as transformadas fracionárias, as quais possuem aplicações em diversas áreas (LIMA, 2012; LIMA, 2014; ZHANG, 2015; CHEN, 2014). Mais especificamente, trata-se de uma generalização da transformada de Fourier que permite que os sinais sejam representados

em domínios intermediários, ou seja, domínios que se encontram entre o tempo e a frequência. Uma das formas de representar a FrFT é através da sua forma integral, como em (1)

$$F^a f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_a(t_a, t) f(t) dt \quad (1)$$

em que o termo $K_a(t_a, t)$ é o núcleo da FrFT que pode ser escrito por meio da sua expansão espectral em termos de autovetores Hermite-Gaussianos dada por (2)

$$K_a(t_a, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \psi_k(t_a) e^{jk_a\pi/2} \psi_k(t). \quad (2)$$

A expansão espectral do núcleo da FrFT em termos de autovetores Hermite-Gaussianos é possível, devido ao fato destes serem uma família canônica de autofunções da FT que pode ser utilizada para definir a FrFT (OLIVEIRA, 2019). Na equação (2) a k -ésima função Hermite-Gaussiana é dada por

$$\psi_k(t) = \frac{2^{1/4}}{\sqrt{2^k k!}} H_k(\sqrt{2\pi}t) e^{-\pi t^2} \quad \forall k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Vários estudos foram realizados nos últimos anos com o objetivo de obter uma versão discreta da FrFT e, com isto, desenvolver aplicações da ferramenta no campo do processamento digital de sinais.

A transformada discreta fracionária de Fourier (DFrFT – do inglês *discrete fractional Fourier transform*), pode ser obtida por meio da expansão espectral a matriz \mathbf{F} de comprimento N da transformada discreta de Fourier (DFT - do inglês, *discrete Fourier transform*)

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} \mathbf{A} \mathbf{E}^T \quad (4)$$

em que os autovetores da DFT estão definidos na matriz \mathbf{E} e os autovalores na matriz diagonal \mathbf{A} . Assim, define-se o operador da transformada fracionária de Fourier por meio da obtenção das a -ésimas potências dos autovalores da DFT, como em (5)

$$\mathbf{F}^a = \mathbf{E} \mathbf{A}^a \mathbf{E}^T \quad \forall a \in \mathbb{R} \quad (5)$$

A obtenção da versão discreta da FrFT através desta abordagem depende do método empregado na expansão espectral da matriz \mathbf{F} e da determinação de um conjunto de autovetores adequado nesta expansão, visto que esta matriz possui autovetores repetidos.

Um dos métodos empregados para a obtenção dos autovetores da DFT é a implementação de matrizes geradoras, que a partir de um autovetor \mathbf{v} relacionado ao autovalor λ determina o autovetor $\mathbf{v}' = \mathbf{S} \mathbf{v}$ associado ao autovalor $\lambda = \lambda^{1/2}$, onde \mathbf{S} é a matriz geradora em questão.

Também são empregados métodos baseados em matrizes que comutam com a

matriz da DFT, ou seja matrizes que possuem conjuntos comuns de autovetores com a matriz \mathbf{F} e ainda, métodos baseados no Teorema Espectral para decompor a matriz \mathbf{F} e construir projeções ortogonais que permitem a obtenção dos autovetores da DFT.

O método empregado neste artigo para o cálculo da DFrFT foi proposto em Ozaktas (1996) e baseia-se na obtenção do núcleo da FrFT como uma sucessão de operadores discretizados. Neste método, a transformada fracionária de Fourier é dada pela integral

$$F^a f(x) = A_\phi e^{i\pi\alpha x^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi\beta x x'} e^{i\pi\alpha x'^2} f(x') dx' \quad (6)$$

onde $\phi = a\pi/2$, $\alpha = \cot(\phi)$, $\beta = \csc(\phi)$ e $A_\phi = \sqrt{1 - i\cot(\phi)}$. Considerando que a representação da função f em todos os domínios fracionais está confinada ao intervalo $[-\Delta x/2, \Delta x/2]$ e limitando o parâmetro fracional a ao intervalo $0,5 < |a| < 1,5$, então a função $e^{i\pi\alpha x'^2} f(x')$ está limitada ao intervalo $\pm\Delta x$ no domínio da frequência e pode ser representada por (7)

$$\sum_{n=-N}^N e^{i\pi\alpha(n/2\Delta x)^2} f\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) \cdot \text{sinc} 2\Delta x x' - \frac{n}{2\Delta x} \quad (7)$$

onde $N = (\Delta x)^2$. Substituindo (7) em (6) e mudando a ordem de integração, obtém-se

$$F^a f(x) = A_\phi e^{i\pi\alpha x^2} \sum_{n=-N}^N e^{i\pi\alpha(n/2\Delta x)^2} f\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi\beta x x'} \cdot (2\Delta x(x' - (\frac{n}{2\Delta x}))) \quad (8)$$

A integral em (8) é igual a $(1/2\Delta n)e^{-i2\pi\beta x(n/2\Delta x)}$, o que permite escrever

$$F^a f(x) = \frac{A_\phi}{2\Delta x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i\pi\alpha x^2} e^{-i2\pi\beta x(n/2\Delta x)} \cdot e^{i\pi\alpha(n/2\Delta x)^2} \cdot f\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) \quad (9)$$

e as amostras do sinal no domínio fracional são obtidas por (10)

$$F^a f\left(\frac{m}{2\Delta x}\right) = \frac{A_\phi}{2\Delta x} \sum_{n=-N}^N \Psi_{mn} f\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) \quad (10)$$

onde,

$$\Psi_{mn} = e^{i\pi(\alpha(m/2\Delta x)^2 - 2\beta(mn/(2\Delta x)^2) + \alpha(n/2\Delta x)^2)} \quad (11)$$

O cálculo direto da FrFT por meio da Equação (10) requer $\mathcal{O}(N^2)$ multiplicações. Um método mais rápido, que reduz o número de multiplicações para $\mathcal{O}(N \log N)$ pode ser implementado por (12)

$$F^a f \frac{m}{2\Delta x} = \frac{A_\phi}{2\Delta x} \Psi_m \sum_{n=-N}^N \Psi_{(m-n)} \Psi_n f\left(\frac{n}{2\Delta x}\right) \quad (12)$$

onde,

$$\Psi_m = e^{i\pi(\alpha-\beta)(m/2\Delta x)^2},$$

$$\Psi_{(m-n)} = e^{i\pi\beta((m-n)/2\Delta x)^2} e$$

$$\Psi_n = e^{i\pi(\alpha-\beta)(n/2\Delta x)^2}.$$

3 I METODOLOGIA

O campo do processamento digital de sinais possui uma estreita conexão entre teoria e aplicações práticas em novas tecnologias. Transformadas de comprimento finito inicialmente definidas no corpo dos reais, eventualmente, dão origem a novas ferramentas de síntese e análise de sinais (OLIVEIRA, 2019).

Neste artigo é apresentado um método de classificação de eventos atípicos no SEP baseado em processamento de sinais e inteligência computacional. A transformação utilizada para a extração de características dos sinais analisados é a DFrFT, por meio da equação (11) (OZAKTAS, 1996).

A utilização de RNA em conjunto com a DFrFT para o reconhecimento de padrões foi proposta em (AYRULU, BARSHAN, 2001), onde os autores demonstram que o erro na classificação de padrões pode ser 5% menor utilizando a DFrFT em comparação com a DFT e 14% menor em comparação com resultados obtidos sem o pré processamento dos sinais.

As RNA são utilizadas para classificar os sinais de entrada de acordo com o tipo de curto-circuito, identificar a fase afetada por faltas bifásicas e monofásicas e para detectar um curto-circuito na rede elétrica.

Em todos os testes realizados foram consideradas 260 amostras de cada evento, cada uma das amostras considerada contém a tensão de fase nas fases A, B e C e as correntes de fase nas fases A, B e C. Na detecção de curto circuito, além de ter sido treinada com os dados que representam faltas, a RNA foi treinada com os dados que representam a operação normal do sistema, de modo a ser possível distinguir a ocorrência de falta da operação normal da rede elétrica.

3.1 Modelagem de Testes

Os sinais utilizados foram obtidos através da simulação da rede de testes IEEE 34 barras (Figura 1) no ambiente virtual *Typhoon HIL*. Todos os sinais foram amostrados a uma taxa de 10,38 kHz.

Este é um Sistema elétrico de distribuição radial com cargas desequilibradas, cujos dados são disponíveis para testar a exatidão de aplicações desenvolvidas. Neste artigo, uma planta eólica média foi conectada à barra 854, onde os curto-circuitos foram medidos. Foram definidos 4 pontos de curto-circuito, nas barras 802, 830, 842 e 852.

Uma carga de 200 kVA com fator de potência de 0,92 indutivo foi conectada ao gerador distribuído no lado de alta tensão do transformador e todas as cargas conectadas ao sistema elétrico foram modeladas como impedâncias constantes.

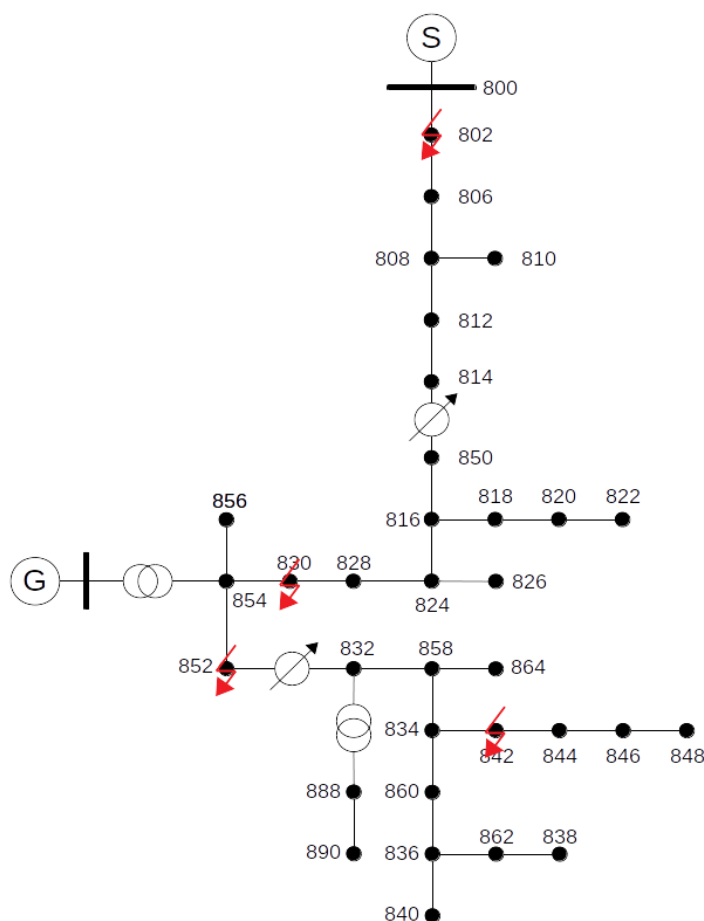


Figura 1: Rede elétrica de testes.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados do gerador eólico conectado à barra 54 podem ser vistos na Tabela 1:

| Parâmetro | Valor |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Potência nominal | 1,5 MVA |
| Frequência nominal | 60 Hz |
| Tensão nominal | 480 V |
| Frequência de chaveamento do inversor | 10 kHz |
| Tensão nominal no barramento CC | 1 kV |
| Eficiência da turbina eólica | 75% |
| Densidade do ar | 1,225 kg/m ² |
| Área efetiva do disco | 1345 m ² |

Tabela 1: Dados do gerador eólico.

No pré processamento dos sinais, são aplicadas aos sinais DFrFTs cujo parâmetro fracional a (que determina a ordem da transformada) varia de $0,5 < a < 0,8$ com passo de 0,1. Após a aplicação da DFrFT são extraídos do sinal no domínio fracional o desvio padrão e a variância, dados por (13) e (14), respectivamente

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad \forall \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

Ao total são extraídas 14 características de cada amostra analisada, o que resulta no seguinte vetor de entrada

$$\mathbf{i} = [\sigma_{V_a}^2, \sigma_{V_b}^2, \sigma_{V_c}^2, \sigma_{I_a}^2, \sigma_{I_b}^2, \sigma_{I_c}^2, \sigma_f^2, \sigma_{V_a}, \sigma_{V_b}, \sigma_{V_c}, \sigma_{I_a}, \sigma_{I_b}, \sigma_{I_c}, \sigma_f]$$

que é normalizado entre 0 e 1 para realizar o treinamento de uma RNA que classifica a GD em ilhada ou não ilhada, sendo a operação não ilhada podendo ser classificada em curto-circuito ou operação normal da GD.

Para classificar os eventos foi utilizada uma RNA do tipo *multilayer perceptron*, com 3 camadas ocultas, as camadas ocultas tem 14, 8 e 4 neurônios, respectivamente. O treinamento da RNA é feito pelo algoritmo de retropropagação do erro *backpropagation* com 70% dos dados de entrada, os 30% restantes são utilizados para o teste da RNA treinada.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de referência utilizado para comprovar a eficiência do método proposto foi a detecção e classificação de curto-circuitos utilizando a DFT. A RNA treinada com a variância e o desvio padrão dos vetores da DFrFT apresentou convergência mais rápida, em 194 iterações contra 200 iterações para a RNA treinada com a variância e o desvio padrão dos vetores da DFT (Figura 2) no teste para detecção de curto-circuito.

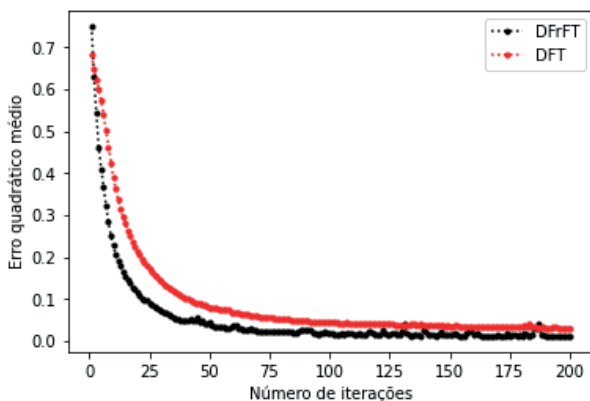


Figura 2: Decaimento do erro quadrático médio.

Na Tabela 2 são demonstrados os resultados obtidos.

| Transformada utilizada | DFT | DFrFT |
|--|--------|--------|
| Precisão para detecção de curto-circuito | 97,77% | 98,02% |
| Número de iterações | 200 | 194 |

Tabela 2: Resultados obtidos para detecção de curto-circuitos.

Os resultados obtidos para a classificação de curto-circuito demonstram a vantagem da utilização da DFrFT com relação a DFT, além da convergência mais rápida (Figura 3) da RNA, a acurácia obtida na classificação dos eventos foi superior.

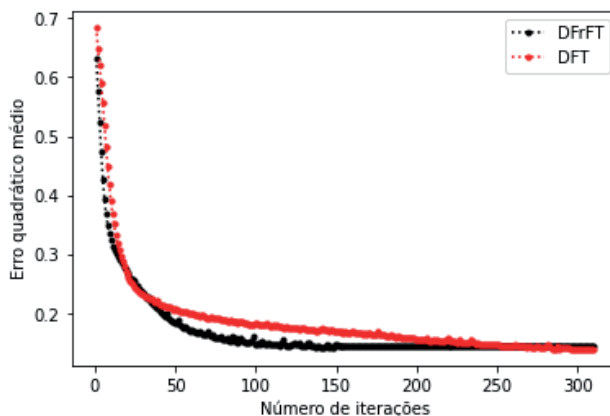


Figura 3: Decaimento do erro quadrático médio.

Apesar da maior acurácia e da convergência mais rápida, o pré-processamento dos dados com a DFrFT tem maior custo computacional, o que deve ser levado em consideração em implementações em tempo real, por exemplo. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 3:

| Transformada utilizada | DFT | DFrFT |
|---|--------|--------|
| Precisão para curto-circuito trifásico | 99,18% | 100% |
| Precisão para curto-circuito bifásico | 85,21% | 94,97% |
| Precisão para curto-circuito monofásico | 96,74% | 98,14% |
| Número de iterações | 310 | 144 |

Tabela 3: Acurácia para classificação de curto-circuito.

5 | CONCLUSÃO

A metodologia proposta para detecção e classificação de curto-circuitos apresentada neste artigo apresentou resultados promissores nos testes realizados e evidencia o papel cada vez mais importante da utilização do aprendizado de máquina em processamento de energia.

No entanto, os resultados foram similares com relação às duas transformadas utilizadas para a detecção e classificação. Embora a acurácia na classificação da falta tenha sido maior quando a DFrFT é aplicada no pré-processamento dos sinais, além da convergência consideravelmente mais rápida, neste caso.

É preciso levar em consideração o custo computacional da aplicação digital da DFrFT, com relação a DFT, neste tipo de aplicação, uma vez que resultados satisfatórios

podem ser obtidos por meio da aplicação da DFT. No entanto, o maior grau de liberdade da DFrFT permite que sejam testados diferentes cenários que podem retornar resultados mais precisos e mais rapidamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia e Inovação – GEITEC e a Associação de Pesquisadores da Região Norte – APRENO, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL, PRODIST–Procedimentos de Distribuição. Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Cartilha de Acesso ao Sistema de Distribuição, 2016.

ANEESH, C. et al. Performance comparison of variational mode decomposition over empirical wavelet transform for the classification of power quality disturbances using support vector machine. **Procedia Computer Science**, v. 46, p. 372-380, 2015.

ARAÚJO, M. A. et al. Classificação de Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica Empregando Redes Neurais Artificiais. **sistema**, v. 2, n. 4, p. 9. 2011.

AYRULU, Birsel; BARSHAN, Billur. Neural networks for improved target differentiation and localization with sonar. **Neural Networks**, v. 14, n. 3, p. 355-373, 2001.

CHEN, Xiaolong et al. Maneuvering target detection via Radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 62, n. 4, p. 939-953, 2014.

GHANIZADEH, Ahmad Javid; GHAREHPETIAN, G. B. ANN and cross-correlation based features for discrimination between electrical and mechanical defects and their localization in transformer winding. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 21, n. 5, p. 2374-2382, 2014.

LI, Weilin; MONTI, Antonello; PONCI, Ferdinanda. Fault detection and classification in medium voltage DC shipboard power systems with wavelets and artificial neural networks. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 11, p. 2651-2665, 2014.

LIMA, Juliano B. A transformada fracional de Fourier: Conceitos e cenários de aplicação. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2012.

LIMA, Juliano B.; NOVAES, L. F. G. Image encryption based on the fractional Fourier transform over finite fields. **Signal Processing**, v. 94, p. 521-530, 2014.

MOHANTY, Soumya R. et al. Comparative study of advanced signal processing techniques for islanding detection in a hybrid distributed generation system. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 6, n. 1, p. 122-131, 2014.

OLIVEIRA NETO, José Rodrigues de. Construção de autovetores de transformadas discretas de Fourier: novos métodos e aplicações. 2019.

OZAKTAS, Haldun M. et al. Digital computation of the fractional Fourier transform. **IEEE Transactions on signal processing**, v. 44, n. 9, p. 2141-2150, 1996.

SUNDARABALAN, C. K.; SELVI, K. Compensation of voltage disturbances using PEMFC supported Dynamic Voltage Restorer. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 71, p. 77-92, 2015.

VALTIERRA-RODRIGUEZ, Martin et al. Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 61, n. 5, p. 2473-2482, 2013.

VIEIRA JR, José Carlos de Melo. Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: uma revisão bibliográfica sobre o tema. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 1, n. 1, 2011.

ZHANG, Yu-Dong et al. Magnetic resonance brain image classification based on weighted-type fractional Fourier transform and nonparallel support vector machine. **International Journal of Imaging Systems and Technology**, v. 25, n. 4, p. 317-327, 2015.

ÍNDICE REMISSIVO

A

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

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

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

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

C

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

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

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

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

D

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

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

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

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

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

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

E

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

Estudo comparativo 13, 15, 275

I

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

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

L

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

M

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

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

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

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

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

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

N

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

P

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

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

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

Q

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

R

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

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

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

S

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

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

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

T

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

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

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

V

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16