

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA

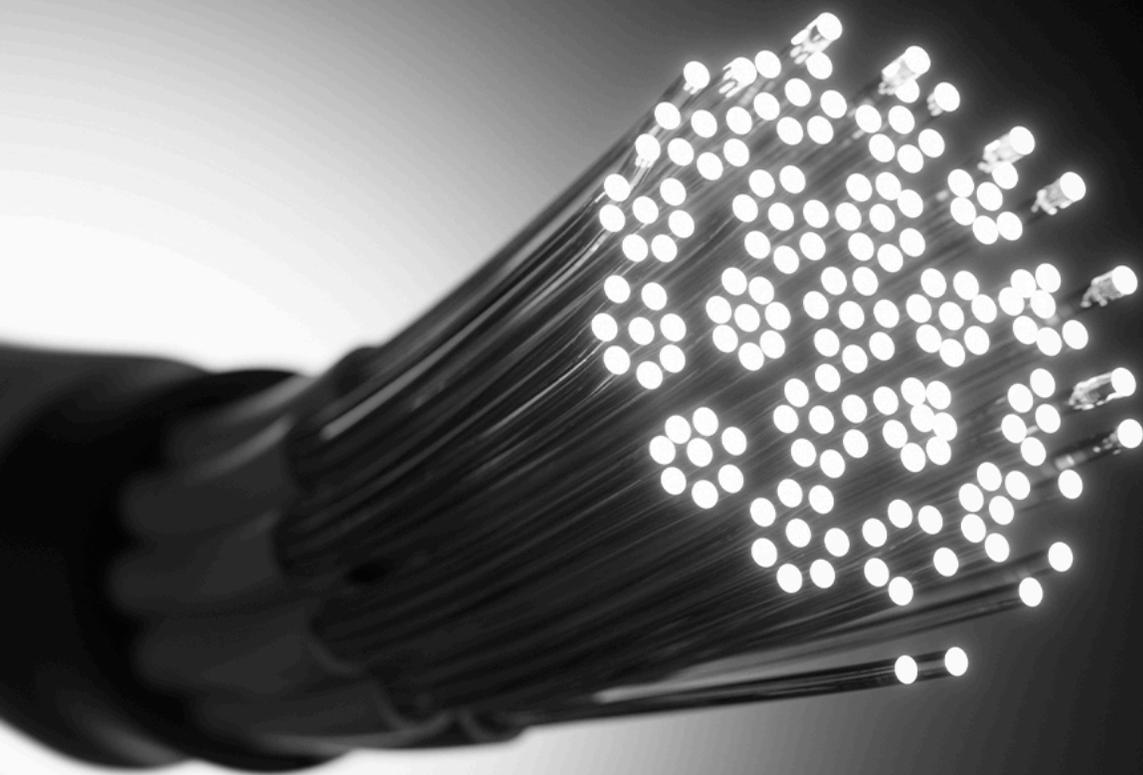


LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA



LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes editoriais

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da capa

iStock

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.

Open access publication by Atena Editora



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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
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. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
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. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
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. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
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^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
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. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
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. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
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
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª 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
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª 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
Profª Drª 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
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª 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
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª 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
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

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

Linguística, Letras e Artes

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

Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica

Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Flávia Roberta Barão
Revisão: Os autores
Organizadora: Lilian Coelho de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5983-260-6
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.606212207>

1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. 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; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Elétrica é um dos ramos mais abrangentes da Engenharia, pois envolve praticamente tudo o que fazemos em nosso dia a dia. Engloba desde sistemas de potência, geração de energia, conversão eletromecânica de energia, eletrônica, telecomunicações, até engenharia biomédica, sistemas digitais e computadores, controle, automação e robótica. É considerada uma área transdisciplinar e versátil, a qual passa por constantes desafios, conforme cresce a demanda por sistemas mais econômicos e eficientes.

Nesse contexto, o e-book “*Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Elétrica*” apresenta uma seleção de 12 artigos que discutem trabalhos e pesquisas desenvolvidos por professores e acadêmicos de várias regiões do Brasil, tendo como base uma teoria bem fundamentada nos resultados práticos nesta área tão promissora.

Este volume aborda temas envolvendo inteligência computacional, para projeto de controladores e manutenção preditiva de máquinas elétricas; fluxo de carga em sistemas elétricos de potência; sistemas fotovoltaicos; fontes de energia alternativas renováveis; segurança de instalações elétricas; tratamento térmico de resíduos, entre outras. Dessa forma, esta obra contribuirá para aprimoramento do conhecimento de seus leitores e servirá de base referencial para futuras investigações.

A todos, uma ótima leitura!

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA ANÁLISE DE AVARIAS EM ROLAMENTOS, UTILIZANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Fábio Muniz Mazzoni
André da Silva Barcelos
Antonio J. Marques Cardoso

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122071>

CAPÍTULO 2..... 15

MÉTODOS MATEMÁTICOS DE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO: LÓGICA FUZZY

Joelson Lopes da Paixão
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122072>

CAPÍTULO 3..... 39

UM ESTUDO SOBRE A ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES FUZZY

Géferson Rodrigo Sabino Silva
Wallysonn Alves de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122073>

CAPÍTULO 4..... 47

FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – UM ESTUDO DE CASO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Hugo Andrés Ruiz Flórez
Diogo Marujo
Gloria Patricia Lopez Sepulveda
Alexander Molina Cabrera

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122074>

CAPÍTULO 5..... 62

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS SUBMETIDOS A PIRÓLISE

Victória Oliveira Diaz de Lima
Matheus de Paula Gonçalves
Débora Hungaro Micheletti
Fernanda Bach Gasparin
Amanda de Araújo Drago
Aline Bavaresco dos Santos
Adriana Ferla de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122075>

CAPÍTULO 6..... 73

ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA NO CAMPUS UFRPE - UACSA

Reinel Beltrán Aguedo
Paula de Tárzia Borba de França
Ania Lussón Cervantes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122076>

CAPÍTULO 7..... 86

INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS DE ENERGIA COM RESTABELECIMENTO OTIMIZADO PARA O AGRONEGÓCIO

Eloi Rufato Junior
Bruno Dias Camargo
Elison de Souza Moreira
Felipe de Souza Kalume

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122077>

CAPÍTULO 8..... 116

MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Bruno Tiago Carneiro Moraes
Felipe Cléber Silveira
Averton da Silva Portigo
Daliel Soares de Souza
Rafael José Fonseca Barbosa
Franciani Diniz Branco
Marcus Vinícius O. Braga

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122078>

CAPÍTULO 9..... 120

FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍTICA

Paulo Fernandes da Silva Júnior
Ewaldo Eder Carvalho Santana
Paulo Henrique Bezerra de Carvalho
Danilo Diniz Meireles
Francarll Oliveira Moreno
Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira
Pedro Carlos de Assis Júnior
Raimundo Carlos Silvério Freire

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122079>

CAPÍTULO 10..... 135

TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS DE PODA URBANA

Eveline Trindade
Maristela Furman
Aline Bavaresco dos Santos
Dilcemara Cristina Zenatti
Adriana Ferla de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220710>

CAPÍTULO 11 143

SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM EMPRESAS TERCEIRIZADAS NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

Anderson Francisco Kaiser

Marcos Hister Pereira Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220711>

CAPÍTULO 12..... 158

REDUCTION OF THE ECOLOGICAL IMPACT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS
WHEN USING SILICONE LIQUID IN THE PROVINCE OF ICA - 2013

Primitivo Bacilio Hernández Hernández

Omar Michael Hernández García

Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220712>

SOBRE A ORGANIZADORA..... 170

ÍNDICE REMISSIVO..... 171

A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA ANÁLISE DE AVARIAS EM ROLAMENTOS, UTILIZANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 08/06/2021

Fábio Muniz Mazzoni

Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade
Federal Fluminense
Rio das Ostras – RJ
<https://orcid.org/0000-0003-2171-2747>

André da Silva Barcelos

CISE-Electromechatronic Systems Research
Centre – University of Beira Interior
Covilhã – Portugal
<https://orcid.org/0000-0002-8126-6067>

Antonio J. Marques Cardoso

CISE-Electromechatronic Systems Research
Centre – University of Beira Interior
Covilhã – Portugal
<https://orcid.org/0000-0001-8737-6999>

RESUMO: Os motores de indução trifásicos são utilizados em larga escala, onde sabe-se que a manutenção destas máquinas é preponderante para a continuidade de processos industriais. Pesquisas recentes apontam, que as avarias nos rolamentos são recorrentes e que se torna necessário desenvolver técnicas para análise, previsão e diagnóstico destas avarias. Neste contexto, este trabalho calcula as transformadas wavelet de Daubechies e Hilbert-Huang dos sinais de corrente de um motor de indução trifásico, quer para a condição normal de funcionamento e quer com avarias. Em seguida, utilizam-se ferramentas estatísticas para extrair

as características dos sinais transformados, tendo como finalidade a criação de uma base de dados para analisar e diagnosticar avarias, com auxílio de algoritmos da inteligência artificial. Os resultados apontam que é possível classificar avarias em rolamentos, utilizando a proposta desenvolvida neste trabalho, com um desempenho superior a 98%.

PALAVRAS - CHAVE: Motor de indução trifásico, identificação de falhas em rolamentos, transformadas no domínio tempo-frequência, inteligência artificial.

PREDICTIVE MAINTENANCE IN BEARING FAILURE ANALYSIS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

ABSTRACT: Three-phase induction motors are used on a large scale, where it is known that the maintenance of these machines is preponderant for the continuity of industrial processes. Recent research shows that bearing failures are recurrent and it is necessary to develop techniques for analyzing, predicting and diagnosing these failures. In this context, this work calculates the Daubechies wavelets and Hilbert-Huang transforms of the current signals of a three-phase induction motor both in normal condition and with failures. Then, statistical tools are used to extract characteristics from the transformed signals, with the purpose of creating a database to analyze and diagnose malfunctions, with artificial intelligence algorithms. Results show that it is possible to classify failures in bearings, using the proposal developed in this work, with a performance higher than 98 %.

KEYWORDS: Three-phase Induction Motor, Bearing Failures Identification, Time-frequency Transforms, Artificial Intelligence.

1 | INTRODUÇÃO

Na economia globalizada o ambiente competitivo pode ser caracterizado pelo desenvolvimento de tecnologias e produtos, capacidade de inovação e otimização de soluções (Gilchrist, 2016). Consequentemente, a melhoria contínua dos processos produtivos é uma realidade para diversos setores de manutenção que atinge diretamente o custo dos produtos e serviços prestados devido à sua relação com áreas operacionais dentro das empresas (Kobbacy and Murthy, 2008).

Nos últimos anos, o aumento da confiabilidade de sensores, dispositivos de transmissão e armazenamento de dados promoveram o aparecimento de novos sistemas de monitorização de equipamentos e condições de operação (Gilchrist, 2016; Paolanti et al., 2018). Simultaneamente, a transmissão em tempo real destas informações industriais realizadas por dispositivos de monitorização oferece uma oportunidade analisar dados de forma inteligente, contextualizado no conceito de manutenção preditiva que pode realizar previsões do estado futuro ou detectar avarias incipientes nos mais diversos equipamentos (Fink, 2020).

Neste contexto, os mais diversos setores industriais fazem uso das técnicas e conceitos desenvolvidos no âmbito da manutenção preditiva, para aplicar suas tecnologias em maquinários industriais. Sem dúvida, a conversão de energia elétrica em mecânica está presente nos processos industriais, onde os motores de indução trifásicos (MIT's) são responsáveis por acionar equipamentos, tais como bombas, válvulas, esteiras, hélices, elevadores, entre outros. Devido ao custo reduzido de fabricação e a versatilidade para aplicações com alto rendimento, estima-se que 70% da energia consumida no setor industrial da União Europeia, está diretamente relacionada com a utilização de motores elétricos trifásicos (Merizalde et al., 2017).

Devido às características de construção e operação do MIT, avarias quer elétricas quer mecânicas podem ocorrer nessas máquinas, acarretando redução de desempenho ou interrupção de processos industriais (Cerrada et al., 2018). Os estudos publicados pelos Institute of Electrical and Eletronics Engineers (IEEE) e Eletric Power Research Institute (EPRI), apontam as falhas encontrados nos MIT's conforme Tabela 1.

	Falha nos rolamentos	Falhas elétricas	Outros
EPRI	42%	48%	10%
IEEE	40%	36%	24%

Tabela 1: Percentual de falhas no MIT de acordo com a EPRI e IEEE

As principais falhas mecânicas nos MIT's são causadas por impactos, devido à fricção do rotor com o estator, desgaste, danos durante a montagem, sobreaquecimento, quebra de barras, falhas nas pistas externa, interna e esferas dos rolamentos, desalinhamento, lubrificação insuficiente, torção e sobrecarga do eixo (Cardoso, 1991; Barcelos e Cardoso, 2021).

Para identificar avarias mecânicas no MIT, torna-se necessário adquirir variáveis de natureza mecânica, elétrica ou térmica em uma etapa determinada aquisição dos sinais. Em seguida, utilizam-se técnicas de processamento de sinais, como a transformada de Fourier para sinais estacionários e waveletes ou Hilbert-Huang, para sinais não estacionários (Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2020). Os três primeiros blocos da Figura 1, resumem essas etapas.

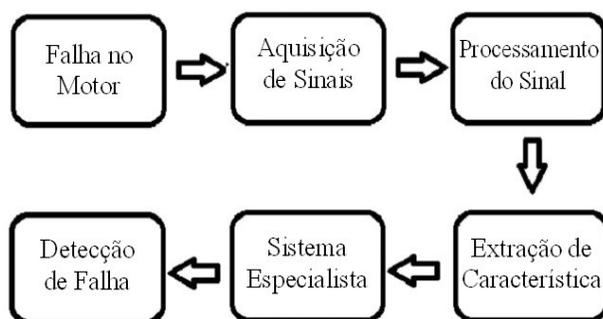


Figura 1: Etapas para a análise e diagnóstico de avarias em motores.

A extração de características recorre a ferramentas estatísticas, com objetivo de formar uma base de dados, que reflete o comportamento do MIT em condições de avarias. Ao final, utilizam-se algoritmos da inteligência artificial (IA), na condição de sistema especialista, para análise e diagnóstico, (Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2020).

Para descrever a metodologia adotada para diagnosticar avarias em rolamentos, a seção 2 apresenta o rolamento e as características associadas. Ainda nesta seção, são descritas as transformadas wavelet (TW) e Hilbert-Huang (THH), que são utilizadas na etapa de processamento de sinais. Em seguida descreve-se uma máquina de vetor de suporte (MVS) e uma rede neural artificial (RNA) para a etapa de diagnóstico.

Na seção 3, definem-se as bases de dados, as medidas estatísticas e os parâmetros dos algoritmos de IA. Na seção 4 apresentam-se os resultados obtidos na identificação de avarias dos rolamentos, com desempenho superior a 96% em todos os algoritmos, por último as principais conclusões encontram-se na seção 5.

2 | BASE TEÓRICA

2.1 Avarias em rolamentos

No momento em que um MIT gira com uma avaria no rolamento, surgem frequências associadas, que são percebidos nas correntes do rotor e do estator. A Figura 2, apresenta um rolamento, onde se encontram representados os detalhes geométricos necessários, para descrever as equações do funcionamento e as frequências típicas que estão associadas às avarias (Rao et al., 2019).

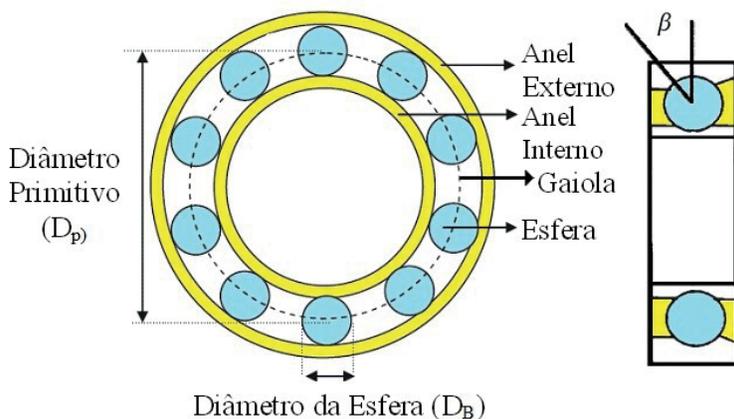


Figura 2: Detalhes geométricos de um rolamento com 10 esferas.

No trabalho de (Silva and Cardoso, 2005a; Silva and Cardoso, 2005b), encontram-se os detalhes para a obtenção das (1), (2), e (3), as avarias nas pistas externas, interna e ainda nas esferas.

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (1)$$

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (2)$$

$$f_b = \frac{D_b}{D_t} f_r \left(1 - \frac{D_B^2}{D_p^2} \cos^2 \beta \right) \quad (3)$$

onde:

f_o frequência típica da pista externa (Hz);

f_i frequência típica da pista interna (Hz);

f_b frequência típica das esferas (Hz);

f_r frequência de rotação do motor (Hz);

D_p diâmetro primitivo (mm);

D_b diâmetro da esfera (mm);

N_b número de esferas;

β ângulo de contato.

O trabalho de (Bessous et al., 2018), propõe que as equações 1 e 2, podem ser aproximadas pelas (4) e (5), para rolamentos de 6 a 12 esferas que são encontrados na maioria das aplicações.

$$f_o = 0.4N_b f_r \quad (4)$$

$$f_i = 0.6N_b f_r \quad (5)$$

2.2 Transformada wavelet

A transformada de Fourier (FT) é utilizada na etapa de processamento de sinais, para adquirir informações de sinais estacionários, no domínio da frequência. Adaptações nesta transformada, como a Short-Time Fourier Transform (STFT), permite a utilização de uma janela de amostragem fixa, que localiza as informações no domínio do tempo-frequência em resolução constante (Aimer et al., 2019).

Em muitas aplicações, a utilização da STFT torna-se inadequada, pois os sinais de corrente do MIT em condição de avaria, apresentam variações dinâmicas na frequência que caracterizam um sinal não-estacionário. (Bessous et al., 2018). Para o processamento de sinais não-estacionários, utilizam-se transformadas em multiresolução que constroem janelas de amostragem de largura variável, no domínio do tempo-frequência (Kamiel and Howard, 2019).

Nesse contexto, a transformada wavelet consegue atender à necessidade de multiresolução, para processamento de sinais não-estacionários no domínio tempo-frequência, pois esta transformada possibilita a utilização de janelas de amostragem de largura variável, de acordo com cada evento no tempo (Gupta et al., 2019). A (6) expressa o produto interno entre o sinal amostrado e a wavelet.

$$\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

em que $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota o produto interno, a função ψ é a wavelet, os parâmetros a e b são os fatores de escalonamento e translação. A alteração do parâmetro a , possibilita o escalonamento das janelas de amostragem do sinal $f(t)$.

Para uma função $\psi_{a,b}$ ser definida como wavelet, ela deve pertencer ao espaço L^2 (espaço das funções integráveis em Lebesgue, em que o seu quadrado também seja), possuir regularidade e energia finita conforme as (7) e (8).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (8)$$

2.3 Transformada wavelet discreta

A transformada wavelet discreta (TWD) da função $\psi_{a,b}$, é obtida ao definir que os parâmetros a e b são inteiros em um intervalo fechado. Ao fazer com que o parâmetro b seja dependente de a , chega-se a expressão de uma wavelet $\psi_{m,n}$ com fatores de escalonamento e translação inteiros, conforme (9) e (10), onde m e n são inteiros que devem ser escolhidos de acordo com a forma da wavelet.

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (9)$$

$$DWT_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a^m}} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) \psi\left(\frac{w(t)}{a^m}\right) \quad (10)$$

onde:

$$w(t) = t - nb_0 a_0^m \quad (11)$$

2.3.1 Interpretação da wavelet

O produto interno entre o sinal $f(t)$ e a wavelet $\psi_{a,b}(t)$, produz coeficientes que constituem um sinal transformado (S). Este sinal é decomposto através de filtros passa-alta e passa-baixa, para gerar dois novos sinais, que contém o conjunto de coeficientes $g[k]$ (passa-alta) e $h[k]$ (passa-baixa) (Bayro-Corrochano, 2019).

Para construção destes filtros, o parâmetro de escalonamento é redefinido para uma função $\phi(t)$, que depende dos coeficientes da filtragem $h[k]$ conforme (12). A função $\psi_{a,b}(t)$ é redefinida para depender da função de escalonamento e de $g[k]$, conforme a (13) (Gupta et al., 2019).

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h[k] \phi(2t - k) \quad (12)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g[k] \phi(2t - k) \quad (13)$$

Desta forma, o sinal S é dividido em duas bandas de filtragem, onde a banda passa-baixas (LP), é formada pelo sinal $h[k]$ e recebe o nome de coeficientes de aproximação (cA). A banda passa-altas (HP), é formada por $g[k]$ e recebe o nome de coeficientes dos

detalhes (cD) (da Silva Barcelos; Mazzoni; Cardoso, 2021).

A decomposição em multiresolução, consiste em utilizar o cA do sinal S, em sucessivas transformadas DWT, com a finalidade de extrair diversos níveis de detalhes, conforme a Figura 3.

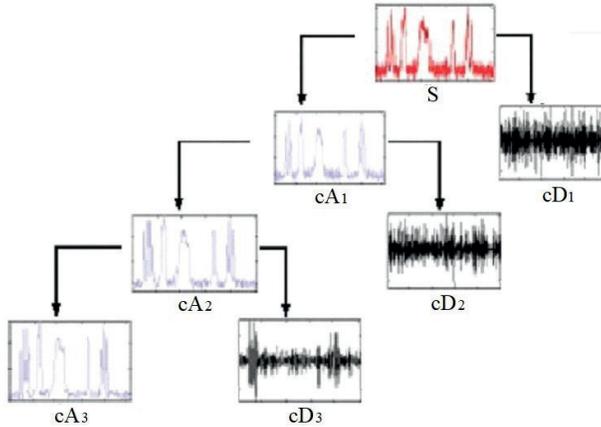


Figura 3: Decomposição do sinal amostrado S em três níveis de Aproximações e Detalhes

Torna-se necessário definir o último nível em que a decomposição cD extrai detalhes do sinal amostrado, sem redundância da informação. Os teoremas explicados em (Bessous et al., 2019) e (Ghods and Lee, 2016) definem um critério de finalização para a decomposição sucessiva, conforme (14).

$$N = \text{int} \left[\frac{\log \left(\frac{f_a}{f_f} \right)}{\log(2)} \right] + 1 \quad (14)$$

Onde N é o nível máximo de detalhamento, f_a é a frequência da amostragem e f_f é a frequência do motor. Evidencia-se que os níveis cD, dependem da taxa de amostragem.

2.3.2 Wavelets de Daubechies

As wavelets propostas por Daubechies em seu trabalho original (Daubechies, 1988), são funções $\psi(t)$ em bases ortonormais, com suporte compacto, regularidade e número máximo de momentos nulos (Gupta et al., 2019). A Figura 4 apresenta a wavelet de Daubechies de ordem N=12 (D12), com N/2 = 6 momentos nulos e suporte compacto N-1 = 11.

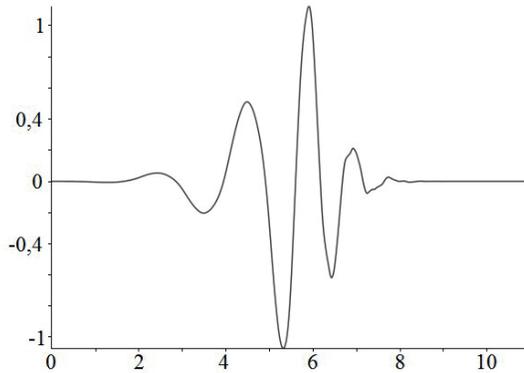


Figura 4: Esboço de uma wavelet D12

Observa-se que a D12 possui máximo e mínimo definidos, energia finita, limita-se ao suporte e tem média zero, conforme (7) e (8). O momento nulo, relaciona-se com a suavidade da resposta em frequência e a capacidade de representar polinômios. Para definir a existência de k momentos nulos, a (15) deve ser satisfeita (Narendiranath et al., 2017).

$$\int x^k \psi(x) dx = 0 \quad (15)$$

As propriedades que determinam a escolha de wavelets de Daubechies, são a ortogonalidade, máximo e mínimo definidos e a quantidade máxima de momentos nulos em suporte compacto. Por definição, suporte compacto é um intervalo fechado que contém toda a energia da função. Fora deste intervalo a energia deve ser zero ou exponencialmente decrescente (Narendiranath et al., 2017).

2.4 Transformada de Hilbert-Huang

A transformada de Hilbert-Huang (HHT) decompõe um sinal amostrado no plano complexo e torna-se adequada para sinais não-estacionários (Bessous et al., 2019), onde se utilizam (16) e (17) para a obter HHT do sinal (s).

$$H(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (16)$$

$$z(t) = s(t) + iH(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (17)$$

onde $H(t)$ é a HHT, i é o número imaginário e P representa o valor principal de Cauchy.

Para calcular a HHT, utiliza-se uma técnica denominada *Empirical Mode Decomposition* (EMD) desenvolvida por Huang e demais pesquisadores (Bessous et al., 2019). Inicialmente, calculam-se os extremos, a média e a função de interpolação de duas

curvas envolventes do sinal amostrado $s(t)$ no domínio do tempo, conforme a Figura 5.

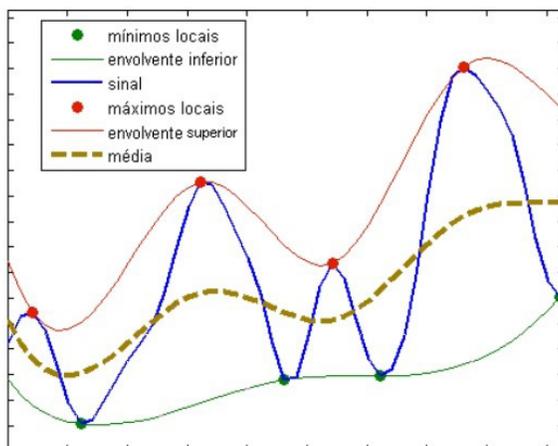


Figura 5: Esboço das envoltórias interpoladas para a EMD

Em seguida, ajusta-se iterativamente a interpolação das envoltórias em cada ponto de máximo e mínimo local, através de um algoritmo denominado *sifting*, com a finalidade de obter funções conhecidas como *Intrinsic Mode Functions* (IMF). Uma função é definida como IMF de um sinal $s(t)$, quando a quantidade de zeros, máximos e mínimos são iguais, ou diferem de uma unidade e as duas curvas envolventes possuem média nula em cada ponto. A Figura 6, apresenta um exemplo de IMF's geradas e o resíduo das interpolações somadas.

Após a obtenção das IMF's, calcula-se a HHT com a finalidade de obter o espectro do sinal no domínio do tempo-frequência. Importa ressaltar que cada IMF contém parte da informação do comportamento do sinal e pode ser utilizada diretamente pelos algoritmos de IA sem que seja necessário calcular a HHT conforme é proposto na seção 3 deste trabalho.

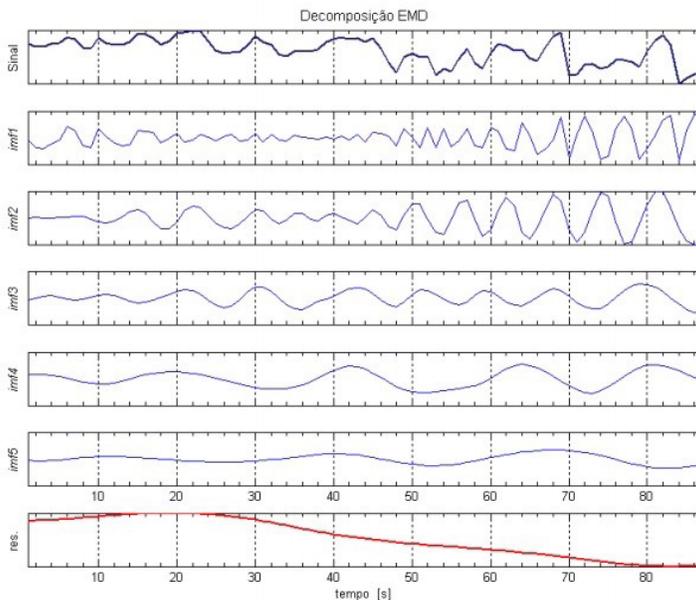


Figura 6: Decomposição de um sinal, IMF's e resíduo em vermelho

2.5 Rede Neural Artificial

A rede neural artificial (RNA) é uma ferramenta da IA, que estabelece relações não-lineares entre entrada e saída (Witten et al., 2016). Espera-se que a RNA aprenda, através do processo iterativo de ajustes de pesos com minimização de erros de classificação dentro de um critério de finalização (Yegnanarayana, 2009).

2.6 Máquina de Vetor Suporte

Um algoritmo de máquina de vetor suporte (MVS) desenvolve hiperplanos de complexidade ajustável, com a finalidade de classificação de dados. Desta forma, a MVS é utilizada como classificador multivariável, regressor e identificador de outliers (Smola and Scholkopf, 2004).

Os hiperplanos criados estabelecem uma margem de separação para classificação das instâncias da base de dados e posterior generalização. A utilização de um kernel permite que a MVS encontre hiperplanos de separação, através de uma transformação não-linear de um espaço de alta dimensionalidade (Witten et al., 2016).

3 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho utiliza quatro bases de dados abertas, elaboradas pela Chair of Design and Drive Technology da Universidade de Paderborn na Alemanha, para análise de avarias em rolamentos. O trabalho de (Lessmeier et al., 2016) explica como foram realizados os testes e a classificação das bases.

A base de dados K002, contém um motor íntegro e será utilizada na comparação com as bases de motores com avarias em rolamentos. Na base KA07, encontra-se um rolamento avariado com furo pontual, localizado na pista externa, com diâmetro da avaria menor que 2mm.

As bases KI04 e KA08 apresentam um rolamento com corrosão pontual, com diâmetro de avaria menor que 2mm, na pista interna e externa respectivamente. Por último, a base KI18 contém um rolamento com corrosão pontual, com diâmetro de avaria menor que 4mm, na pista interna. Aplica-se a TWD D20, a fim de gerar 6 sinais de detalhes e a EMD para calcular 6 IMF's.

Em seguida, extraiu-se a média, média harmônica, curtose, antissimetria e entropia dos sinais transformados. Na MVS, utilizou-se o kernel gaussiano (g-MVS) e o polinomial de ordem p [1, xy,x,y] p (p-MVS). Para o fator complexidade, variou-se exponencialmente o parâmetro c na base 2, até que as classificações atingissem desempenho acima de 96%.

A RNA, inicialmente contém apenas 1 camada oculta, com 12 neurônios e algoritmo de retropropagação do erro. Para os testes, limitou-se a 1000 épocas, com taxa de aprendizagem entre 0,32 e 0,10, momento entre 0,2 e 0,1, tempo de computação de 0,15 horas e regularização Lasso. Realizaram-se alterações na arquitetura da rede, limitadas entre 8 e 16 neurônios na camada oculta.

A seguir, mostram-se os resultados na comparação entre o motor íntegro e o motor com avaria, com os algoritmos wavelet-MVS, wavelet-RNA, EMD-MVS e EMD-RNA. Percebe-se que o treino das redes somente com IMF's, sem efetuar a transformada de Hilbert, apresenta um resultado relevante.

4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

A concatenação da base de dados (K002, KA07, KI04, KA08 e KI18) gera 20000 instâncias. A Tabela 2, apresenta o desempenho da TWD D20, com 6 decomposições de detalhes em 5 características (30 variáveis).

	KA07	KA08	KI04	KI18
NA	0,991	0,966	0,962	0,984
p-MVS	0,986	0,974	0,986	0,971
g-MVS	0,970	0,961	0,961	0,975

Tabela 2: Desempenho de classificação com wavelet Daubechies de ordem 20

As classificações com a MVS em kernel gaussiano (g-MVS) apresentam desempenho inferior aos demais. Os algoritmos RNA e a MVS com kernel polinomial $p = 1$, (p-MVS) convergem o treino na ordem de 100 segundos. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos

com as 6 IMF's e as mesmas características extraídas (30 variáveis).

Ao comparar as duas tabelas, percebe-se que as duas transformadas apresentam resultados semelhantes. Observa-se que as avarias acentuadas, relacionadas nas bases de dados KA07 e KI18 são classificadas com desempenho superior. Com isto é possível monitorar a tendência de aumento ou degradação de uma avaria, à medida que uma classificação melhora em desempenho.

	KA07	KA08	KI04	KI18
RNA	0,984	0,998	0,982	0,984
p-MVS	0,988	0,987	0,990	0,991
g-MVS	0,963	0,964	0,978	0,975

Tabela 3: Desempenho de classificação através da EMD e IMF's

5 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta as bases para a análise de avarias em rolamentos e duas transformadas de sinais não-estacionários, que são a wavelet discreta de Daubechies e a EMD de Hilbert-Huang. Propõe cinco características que devem ser extraídas destes sinais e utiliza uma rede neural artificial e máquinas de vetor de suporte para diagnóstico de avarias.

No final deste trabalho, apresentam-se os resultados obtidos pela classificação e conclui-se que, após os ajustes necessários, é possível classificar as avarias em rolamentos utilizando-se os sinais de corrente elétrica do motor, com desempenho na ordem de 98% de acertos. Sem dúvida, as ferramentas de inteligência artificial podem ser aplicadas na área de manutenção preditiva.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional para a Competitividade e a Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do Projecto POCI-01-0145-FEDER029494, e por Fundos Nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito dos Projectos PTDC/EEI-EEEE/29494/2017, UIDB/04131/2020 e UIDP/04131/2020. Os autores agradecem ainda à Petrobras Transporte S.A.

Este trabalho é dedicado ao co-autor André da Silva Barcelos (in memoriam), por todo seu empenho no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AIMER, Ameer Fethi et al. **Bearing fault diagnosis of a PWM inverter fed-induction motor using an improved short time Fourier transform.** Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 14, n. 3, p. 1201-1210, 2019.

BARCELOS, Andre S.; CARDOSO, Antonio J. Marques. **Current-Based Bearing Fault Diagnosis Using Deep Learning Algorithms.** Energies, v. 14, n. 9, p. 2509, 2021.

BARCELOS, André S.; MAZZONI, Fábio Muniz.; CARDOSO, Antonio J. Marques. **Análise De Avarias Em Rolamentos, Utilizando Algoritmos De Inteligência Artificial.** Congresso Brasileiro de Automática, v. 2, n. 1, 2020.

BAYRO-CORROCHANO, Eduardo. **Applications of Lie Filters, Quaternion Fourier, and Wavelet Transforms.** In: Geometric Algebra Applications Vol. I. Springer, Cham, 2019. p. 489-517.

BESSOUS, N.; SBAA, S.; MEGHERBI, A. C. **Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques.** Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, p. 571-582, 2019.

BESSOUS, N. et al. **Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform.** International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 9, n. 2, p. 335-343, 2018.

CARDOSO, António João Marques. **Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos.** 1991. Universidade de Coimbra.

CERRADA, Mariela et al. **A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 99, p. 169-196, 2018.

DA SILVA BARCELOS, André; MAZZONI, Fábio Muniz; CARDOSO, António João Marques. **Análise de avarias em rolamentos, utilizando algoritmos de inteligência artificial.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 29080-29093, 2021.

DAUBECHIES, Ingrid. **Orthonormal bases of compactly supported wavelets.** Communications on pure and applied mathematics, v. 41, n. 7, p. 909-996, 1988.

FINK, Olga. **Data-driven intelligent predictive maintenance of industrial assets.** In: Women in Industrial and Systems Engineering. Springer, Cham, 2020. p. 589-605.

GHODS, Amirhossein; LEE, Hong-Hee. **Probabilistic frequency-domain discrete wavelet transform for better detection of bearing faults in induction motors.** Neurocomputing, v. 188, p. 206-216, 2016.

GILCHRIST, Alasdair. **Industry 4.0: the industrial internet of things.** Apress, 2016.

GUPTA, Kanika et al. **Daubechies wavelets: Theory and Applications.** 2019. Tese de Doutorado.

KAMIEL, Berli Paripurna; HOWARD, Ian. **Ball bearing fault diagnosis using wavelet transform and principal component analysis.** In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019. p. 050031.

KOBBACY, Khairy Ahmed Helmy; MURTHY, DN Prabhakar (Ed.). **Complex system maintenance handbook**. Springer Science & Business Media, 2008.

LESSMEIER, Christian et al. **Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification**. In: Proceedings of the European conference of the prognostics and health management society. 2016. p. 05-08.

MERIZALDE, Yuri; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis; DUQUE-PEREZ, Oscar. **State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors**. *Energies*, v. 10, n. 7, p. 1056, 2017.

NARENDIRANATH, Babu T. et al. **Journal bearing fault detection based on Daubechies wavelet**. *Archives of Acoustics*, v. 42, 2017.

PAOLANTI, Marina et al. **Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0**. In: 2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). IEEE, 2018. p. 1-6.

RAO, S. Ganesh et al. **Fault Analysis of Induction Motor**. In: 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). IEEE, 2019. p. 1-4.

SILVA, José LH; CARDOSO, AJ Marques. **Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach**. In: 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. IEEE, 2005. p. 6 pp.

SILVA, José LH; CARDOSO, AJ Marques. **Diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos**. Universidade de Coimbra, 2005.

SMOLA, Alex J.; SCHÖLKOPF, Bernhard. **A tutorial on support vector regression**. *Statistics and computing*, v. 14, n. 3, p. 199-222, 2004.

WITTEN, I. H. et al. **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques**. Hamilton, ON: University of Waikato. 2016.

YEGNANARAYANA, Bayya. **Artificial neural networks**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agronegócio 11, 45, 86, 87, 112
AMPL 10, 47, 48, 49, 52, 53, 55, 58, 59, 61
Arduino Uno 116, 117, 118

B

Biocombustíveis Sólidos 62
Biomassa 24, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 88, 89, 90, 91, 95, 100, 101, 103, 107, 108, 113, 135, 136, 137, 141, 142

C

Canteiro de Obras 143, 144, 145, 150, 151, 152, 154, 156
Carbonização 62, 64, 68, 69, 71
Construção Civil 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 156
Consumo 11, 24, 63, 78, 83, 96, 98, 100, 101, 103, 108, 109, 112, 116, 117, 118
Controladores Fuzzy 10, 39, 44, 45
Cooperativa 143, 145, 148, 149, 151, 153, 156
Coproduto 135, 141
Corrente 1, 5, 12, 75, 80, 91, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 116, 117, 146

D

Dielectric Fluid 159

E

Energia 9, 11, 2, 5, 8, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 48, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 122, 123, 135, 136, 138, 141, 142, 150, 151
Energia Elétrica 11, 2, 24, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 61, 73, 74, 76, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 98, 100, 102, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 141, 150
Environmental Management System 159
Excentricidade 120, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132

F

Filtros Planares 120, 122, 124
Fluxo de Carga 9, 10, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 61
Fontes Renováveis 24, 63, 87, 89, 114

Fuzzy 10, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46

G

Geometria Elíptica 120, 124, 125, 131

I

Identificação de falhas em rolamentos 1

Inteligência Artificial 10, 1, 3, 12, 13, 15, 16

L

Lógica Fuzzy 10, 15, 16, 17, 20, 23, 36, 37, 39, 40, 44, 45

M

Mamdani 18, 19, 20, 39, 40, 44

Medidor 11, 116, 117, 118, 119

Motor de indução trifásico 1

O

Otimização Matemática 47, 48, 49, 53, 61

P

Pirólise 10, 62, 68, 135, 136

R

Reconfiguração Automática 87, 89, 94, 114

Redes Inteligentes 86, 87, 88, 91

Resíduos Agroindustriais 62, 63

S

SIF 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 35

Sistemas Elétricos de Potência 9, 10, 47

Sistemas Fotovoltaicos 9, 23, 73, 77

Solver Knitro 47

Sombreamento 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 84, 85

Sustentabilidade 27, 63, 73, 84, 86

T

Tensão 51, 74, 87, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 113, 116, 117, 150

Terceirizados 143, 144, 145, 146, 151, 156, 157

Torrefação 62, 64, 68, 69, 70, 71, 135, 136, 137, 138, 141

Transformadas no domínio tempo-frequência 1

Transformer 159

V

Viabilidade 66, 73, 74, 77, 82, 84, 85, 86, 88, 93, 108, 110, 114

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

Atena
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

 **Atena**
Editora

Ano 2021