

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. Aleksandro 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

A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 06/11/2020

Rogério Andrade Flauzino

USP

São Carlos – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/4487681434814567>

Gabriel de Souza Pereira Gomes

Radice

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/8939339011412533>

Daniel Carrijo Polonio Araujo

Radice

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/1537435469399482>

Mateus Batista de Moraes

Treetech

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/7679523540529839>

Rafael Prux Fehlberg

Radice

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/8374623802071665>

Murilo Marques Pinto

Radice

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/2294121203376400>

Arthur Franklim Marques de Campos

CEB

Brasília – Distrito Federal

<http://lattes.cnpq.br/7575618502572567>

Marcos Eduardo Guerra Alves

Radice

Atibaia – São Paulo

<http://lattes.cnpq.br/9577170219433972>

ABSTRACT: This paper proposes a new approach for power transformers dissolved gas analysis (DGA) using Statistical Machine Learning Techniques and Neural Networks to compose a stairway model which performs analysis in three levels in order to check the existence of faults and which type it most probably is. The proposed approach shortcuts the problem of lacking reliable data related to the type of fault creating a model with three levels of analysis. The first one uses real data from an energy company and from IEC TC 10 data to classify the DGA samples as faulty or normal. After that, a second one based just on IEC TC 10 takes place to classify three possible types of the fault. The third level is used to classify 5 types of fault in a more detailed analysis. The proposed levels of the model achieved an accuracy in the test set of 100 %, 94 % and 92 % respectively.

KEYWORDS: Power Transformer; Condition Based Maintenance; Fault Prediction; Dissolved Gas Analysis; Neural Network; Classification.

RESUMO: Este trabalho propõe uma nova abordagem para análise de gás dissolvido (DGA) em transformadores de potência, utilizando técnicas de Aprendizado de Máquina Estatística e Redes Neurais para compor um modelo de progressivo que realiza análises em três níveis a fim de verificar a existência de falhas e qual

o seu tipo mais provável. A abordagem proposta contorna o problema da falta de dados confiáveis relacionados ao tipo de falha, criando um modelo com três níveis de análise. O primeiro usa dados reais de uma empresa de energia e de dados IEC TC 10 para classificar as amostras DGA como defeituosas ou normais. Depois disso, um segundo baseado apenas no IEC TC 10 ocorre para classificar três possíveis tipos de falha. O terceiro nível é usado para classificar 5 tipos de falhas em uma análise mais detalhada. Os níveis propostos do modelo atingiram uma precisão no conjunto de teste de 100%, 94% e 92% respectivamente. **PALAVRAS-CHAVE:** Transformador; Manutenção Baseada na Condição; Predição de Falhas; Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante; Redes Neurais.

1 | INTRODUCTION

Power transformers are one of the most important and expensive assets in energy power systems. As presented by (CARRIJO, 2009), Power transformers are responsible for supplying energy for loads that goes from houses to hospitals and big industries. Therefore, to ensure its reliable and safe operation, besides avoiding incipient faults, monitoring the condition of those assets plays a major role. Analysis of dissolved gas in oil is considered to provide a reliable diagnostic tool for assessing the condition of power transformers. DGA provides information about the gases formed inside the asset and these can be related to the occurrence of some faults. Regarding the analysis and interpretation of these tests, lots of methods have been developed, such as Doernenburg, Rogers and Duval methods. The first two methods use gas ratios to detect the existence and the type of faults, but they have the disadvantage of not being closed methods, i.e. they don't provide diagnostic to any gas quantity (e.g. low gas concentration faults). Doernenburg gas ratios can be seen in Table 1. On the other hand, Duval's method presented in (DUVAL, 2008) and (DUVAL AND LAMARRE, 2014) use gas percentage and is closed, hence always providing diagnostics as can be seen in Figure 1.

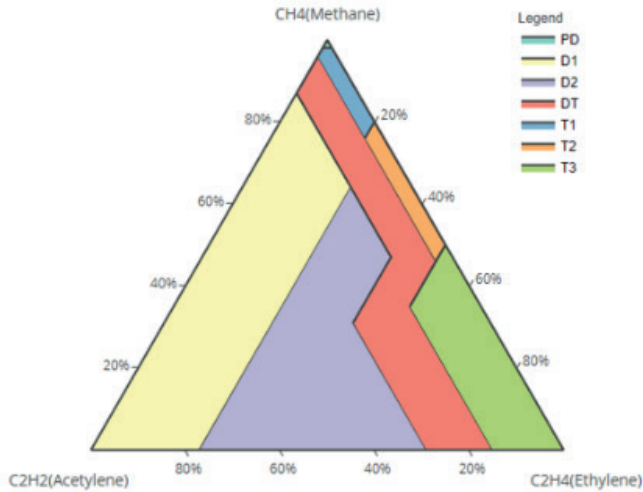


Figure 01: Duval Triangle 1 for DGA Analysis.

There are also some methods that are a combination of the previous ones such as the method presented in (KIM et al., 2013) and methods that are based in the thermodynamics of gas formation as (CRUZ et al., 2015).

The major drawbacks of these methods are the facts that they need some specialist interpretation for the diagnostics without supporting decision making, they just use some gas ratios and they all have been constructed considering only IEC TC 10 database, which is a database that compiles a lot of power equipment post-mortem analysis, relating the failures with DGA tests performed on those assets. In order to overcome the problem of lack of expert personnel, some solutions use fuzzy logic as (ABU-SIADA et al., 2013), (KHAN et al., 2015) and (NOORI et al., 2017) and combinations of Neural Networks and other standard methods, like the method presented in (CHATTERJEE et al., 2019). However, these propositions do not contemplate other points like data reliability and continuous training.

Suggested fault diagnosis	Ratio 1 (R1) CH ₄ /H ₂		Ratio 2 (R2) C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄		Ratio 3 (R3) C ₂ H ₂ /CH ₄		Ratio 4 (R4) C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	
	Oil	Gas space	Oil	Gas space	Oil	Gas space	Oil	Gas space
1. Thermal decomposition	>1.0	>0.1	<0.75	<1.0	<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
2. Partial discharge (low-intensity PD)	<0.1	<0.01	Not significant		<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
3. Arcing (high-intensity PD)	>0.1 to <1.0	>0.01 to <0.1	>0.75	>1.0	>0.3	>0.1	<0.4	<0.2

Table 1: Ratios for keys gases (Bakar et al., 2014)

2 I GASES GENERATION IN TRANSFORMERS DUE TO FAULTS

During normal operating conditions, it is common for gases to be generated inside the equipment. Under abnormal conditions, such as electrical and thermal stresses, the

formation of these gases can vary depending on the type of stress suffered. Typical gases that appear in insulating oil are hydrogen and hydrocarbons such as methane, ethane, ethylene and acetylene. Each of these gases has a specific formation temperature, as can be seen in the Figure 2.

Hydrogen formation starts at around 150°C and increases as the temperature increases. Methane also starts to be produced at around 150°C, but after reaching a maximum value it starts to decrease with increasing temperature. The same happens with ethane, which starts to be produced at 250°C, and ethylene which starts its production at around 350°C. After reaching their maximum, they all start to decrease as the temperature increases.

Finally, acetylene production starts between 500 and 700°C and increases as the temperature increases. Between 200°C and 300°C, the methane production rate exceeds hydrogen production. At around 275°C, ethane production exceeds methane production. At 450°C, the production of hydrogen begins to be greater than the production of all other gases until around 750°C, when the production of acetylene starts to increase.

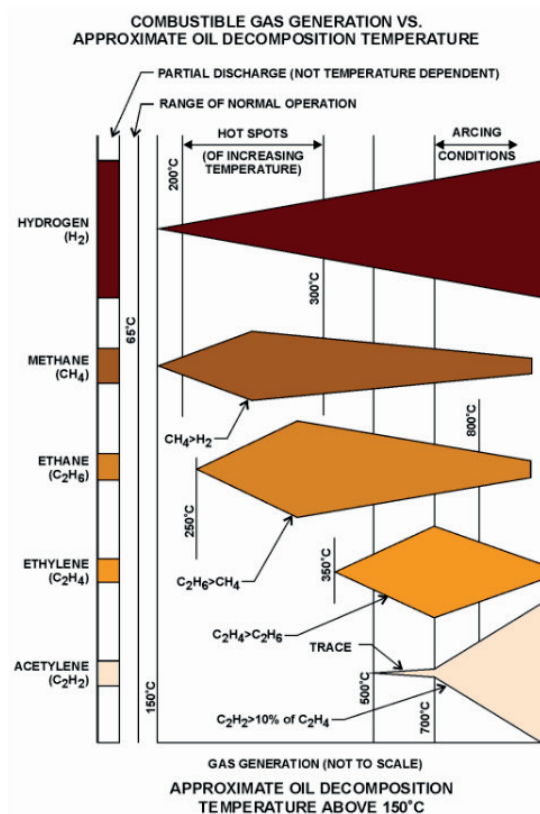


Figure 2: Faults and generated gases (Rogers, 1978)

Usually, the initial quantity of each gas and the rate of formation varies with several factors such as equipment design, applied load and type of material used for solid and liquid insulation. Figure 3 shows examples of faults in power transformers. The relative concentration of the gases can be seen in the Figure 4.

In this scenario, this paper proposes a new approach based on a three-level stairway analysis, using all gases available in a DGA test, except for nitrogen and oxygen, aiming to overcome the complexity and strong dependence of experts that other methods present.



Figure 3: Fault examples (from the left to the bottom: D2,D1, T3 and T1) (CIGRE - JWGD1/A2.47, 2019)

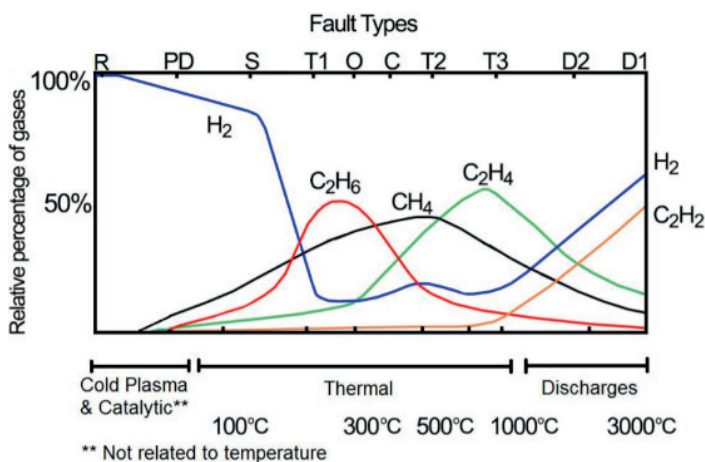


Figure 4. Faults and generated gases (CIGRE - JWGD1/A2.47, 2019)

In the first level of the stairway, it only identifies the existence of a fault. Since IEC TC 10 has few examples, this approach also uses practical data collected from real cases

analyzed by transformers specialists. The reliability of this first analysis is high because it is easier for specialists to analyze the existence of a fault than to identify its type. The second level of the stairway analysis performs an identification among three main types of faults and is trained, validated and tested using only IEC TC 10, because there is still a lack of reliable data classifying the fault type. The third level goes deeper, identifying one among 5 types of faults, also based on IEC TC 10. These serialized models provide a good support for decision-making, allowing it to be performed in a three level, requesting the specialist analysis only when really necessary. Besides, it provides a straightforward way to reinforce model training without losing reliability, since the training process of one stairway level does not interfere on the other.

3 | THE STAIRWAY MODEL

When performed by a specialist, a dissolved gas analysis usually follows a diagram like the one presented in Figure 5. First, the specialists classify the transformer as faulty or normal. This part of the process has high reliability, once it is easy to verify if there is a fault or not, e.g. if gas concentrations or rate of gas increase are above typical values for the equipment. After that, the specialist uses some standard method, like Duval's Triangle, to analyze the type of the fault. Then, if the fault diagnostic encountered is dangerous and require immediate action, those will be taken in order to preserve the asset, like shutting down the transformer or scheduling some corrective inspection or maintenance.

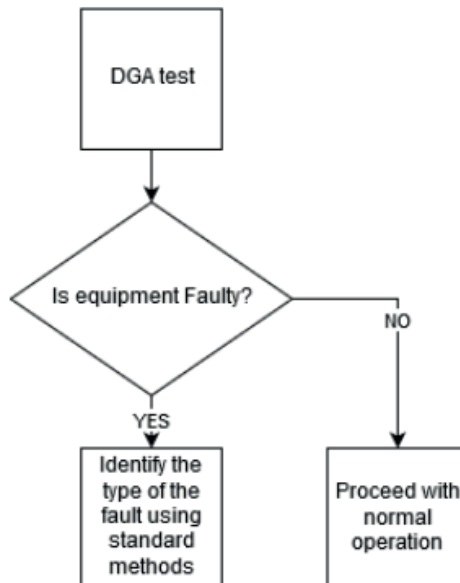


Figure 5: Simple DGA analysis procedure

One way to address this issue is to create a serialized expert analysis in the same way that a human expert would in a real case. The serialized model consists of a three-step analysis, in degrees of data reliability and decision-making support. Figure 6 presents the serialized model.

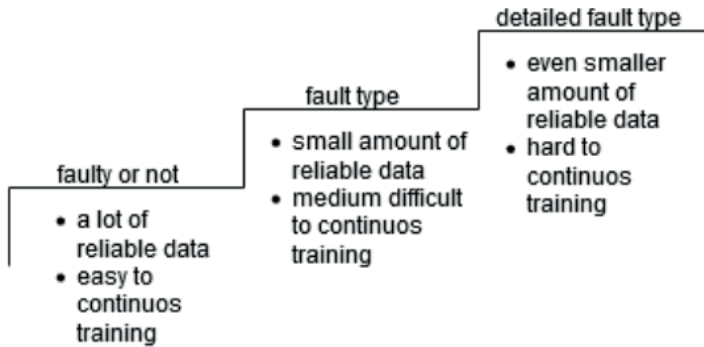


Figure 6: A stairway model for DGA Analysis

In the first step, the model provides information regarding the existence of a fault that can be identified with a DGA test. This first step exists to reduce or eliminate the necessity of an expert analysis to identify if the equipment is faulty or not and can be trained with a lot of high reliable data, once specialists already record such analysis in a proper way. In the sense of decision making, this first analysis give information to the responsible maintenance personnel about which equipment need more attention. In the second step, the model gives information about the type of the fault in three classes: partial discharges (PD), thermal fault (T) and energy discharges (D). In this step, the specialist may be not so precise like in the first one. Even considering that there are other types of tests that can identify the types of faults, like the partial discharge test, they are still expensive and performed only in cases of high necessity. In this sense, it is harder to obtain reliable data to test the models for the second step, but it is still feasible. In the decision-making point of view, the second step gives a closer look in the state of the asset, providing to the maintenance personnel information about the severity of the fault. For example, partial discharges damage the equipment, but are not so severe like energy discharges. Hence, step two can provide a general, yet precise classification of fault type, allowing further actions to be planned. In the third level, the model classifies the faults in five types, being: partial discharges (PD), low energy discharges (D1), high energy discharges (D2), thermal faults of low and medium temperature (T1 or T2) and thermal faults of high temperature (T3). The Stairway model decision-tree is shown in Figure 7.

The idea was not to create new classifications of faults, for the existing classification is widely accepted and consolidated. Even considering that the third level of the stairway

gives a much better information about the fault and consequently about the state of the equipment, finding reliable practical data to train this third step of the model is even harder. That being said, the third particular level needs more expert analysis, both to obtain relevant data to train the model and to confirm further diagnostics provided on this level. This step can be later improved by considering the equipment’s behavior over the time on the training process.

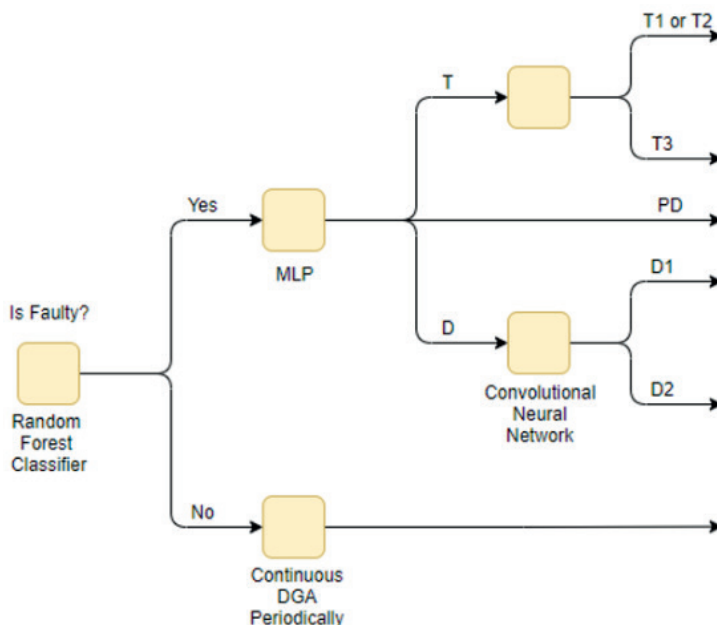


Figure 7: Stairway model decision tree

4 | STAIRWAY MODEL IMPLEMENTATION

4.1 Implementation

To implement the Stairway model, one specialized model was trained and validated for each level as proposed. The validation was performed using a k-fold cross-validation approach with 5 folds. For the first level, a Random Forest composed by 400 Trees was used in the way presented in Figure 8. This Forest was trained, validated and tested using IEC TC 10 database and real data (50 power trans-formers) from a Brazilian energy company. The model performance was quite remarkable, reaching an accuracy of 100 % in the test data. The results are detailed and discussed in the next section.

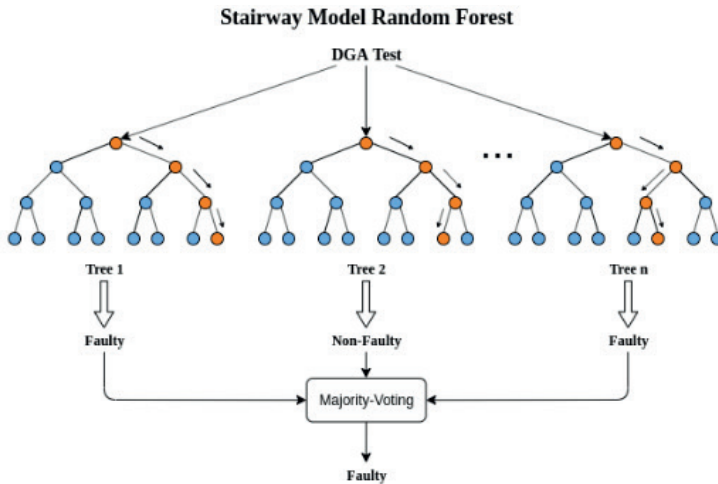


Figure 8: Stairway Random Forest (simplified)

For the second level, only IEC TC 10 was used for training, validating and testing, because there were not enough practical data to do differently. The architecture of the specialized chosen to perform this analysis was a simple Multi-layer Perceptron, with the topology presented in Figure 9. The model reached an accuracy of 94.5 %.

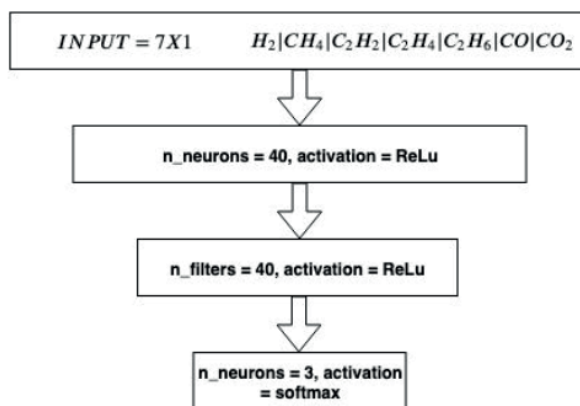


Figure 9: Multi-layer Perceptron Topology

For the third and final level, also IEC TC 10 was used for training, validating and testing. The architecture chosen for this case was a convolutional neural network because a simple MLP did not perform well for this case. The topology of the network can be seen in Figure 10. The model achieved an accuracy of 92 %, an expected result when considering the simplicity of the used convolutional neural network.

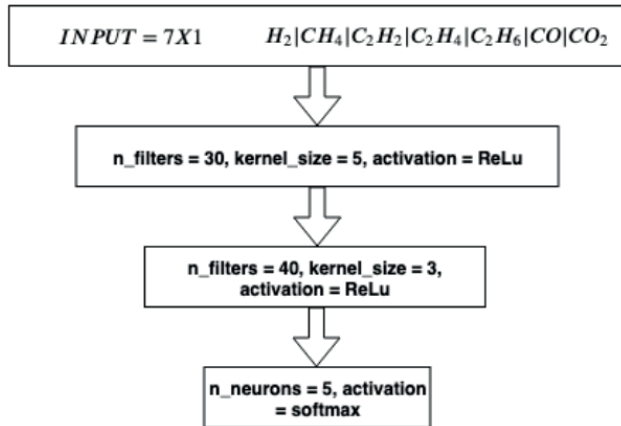


Figure 10. Convolutional Neural Network Topology

5 | RESULTS AND DISCUSSIONS

The results for the first level of analysis is presented in Table 2.

	Train	Validation (kfold)	Test
Accuracy	100 %	96 \pm 0.09%	100%

Table 2: Results for the first level of analysis

As it can be seen, the model performed quite well in identifying the existence of a fault. Nevertheless, due to the small amount of data, the model is a little over-fitted, which can be seen in the validation analysis performed through across-validation approach using 5 folds (four for training and one for testing). In order to solve this problem, more data is needed. Even so, the mean accuracy obtained was 96 %, which proves this fact, but the standard deviation of the cross-validation was small (around 0.09 %) which means that the model is consistent. An analysis of feature importance was performed based on the average influence of each gas on the impurity decrease of the random forest trees. This was done in order to identify which gases are more relevant when classifying the equipment as faulty. This method is in general biased for continuous or high-cardinality categorical variables. In our case we only have continuous variables, thus the use of this method is quite effective, mainly considering that it runs fast. The result is shown in Figure 11.

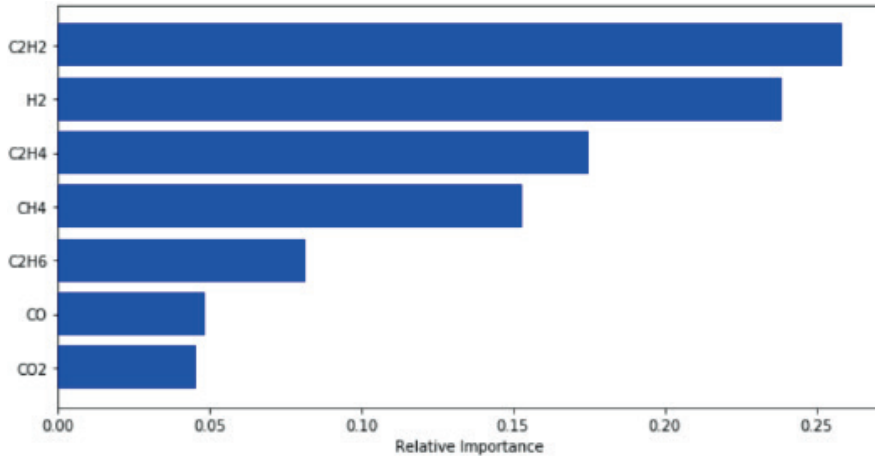


Figure 11: Relative Importance of Each Gas for Faulty or Not

As can be seen, acetylene (C2H2), hydrogen (H2) ethylene (C2H4) and methane (CH4) have together around 80% of the importance, roughly indicating that these three gases alone can be used to identify the existence of a fault in a reliable way. This result is physically consistent with (CIGRE - JWG D1/A2.47, 2019). Further studies will be conducted on feature extraction and selection to confirm these facts. For the second level of analysis, the results can be seen in Table 3. The accuracy obtained in the training set was greater than the obtained in both validation and test. This shows that the model is over-fitted. To solve this problem, more data is needed, once hyper-parameter tuning did not solve this problem. Nevertheless, the model is also consistent, as can be seen considering the small standard deviation presented by the cross-validation.

	Train	Validation (kfold)	Test
Accuracy	100 %	91 \pm 0.15%	94 %

Table 3: Results for the second level of analysis

The third level of analysis performed almost like the second one as can be seen in Table 4. It also suffered over-fitting, as can be seen in the difference between train, validation and test. It is a big challenge to solve the over-fitting problem of this level, because it is hard to find reliable data for training the model. More post-mortem equipment analysis is needed.

	Train	Validation (kfold)	Test
Accuracy	100 %	90 \pm 0.15%	92 %

Table 4: Results for the third level of analysis

6 | CONCLUSIONS

As technology develops, the existence of true specialists is becoming more vital to the life of any asset in the power system, but a lot of them are getting retired and stopping to work. With this in mind, true specialists work hours become scarce and more expensive.

The idea of this paper is not to replace specialist analysis, but to help them to obtain more quickly and reliable results. Data analysis and neural network can be powerful tools in the hands of maintenance personnel and engineers if its limitations are well known, considered throughout the modeling and, when possible, dealt with.

A stairway model for DGA analysis was proposed on this paper in order to help decision-making process, specially reducing the need of equipment specialists for simple cases of DGA tests. In the first level, it provides information about the main state of the equipment, concerning its condition (faulty or not). The second step provides information about the general type of the fault, dividing it in three possible major types: partial discharges, energy discharges and thermal fault. The third step provides a more detailed analysis of the fault type, dividing it in five types: partial discharges, low energy discharges, high energy discharges, low and medium temperature thermal fault and high temperature thermal fault. Moreover, it provides a different way of gathering data, where data for the first level are easier to obtain and more reliable than for the next steps respectively. The models developed to perform the analysis of each step reached a test accuracy of 100 % (first step), 94 % (second step) and 92 % with a very low standard deviation for the validation set, showing that the analysis is consistent. Even so, the limitations of the models were shown and explicitly considered as points where a specialist analysis might still be necessary. As known limitations, due to the small amount of data, the methodology proposed by this paper serves as a starting point for the development of a robust model where more data will be used to train, test and validate the models. The research next step will be getting more data for training the first and the second step, considering it is easier to find data for them when comparing with the third step.

REFERENCES

ABU-SIADA, Ahmed; HMOOD, S.; ISLAM, Syed. A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 20, n. 6, p. 2343-2349, 2013.

BAKAR, Norazhar Abu; ABU-SIADA, Ahmed; ISLAM, Syed. A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 30, n. 3, p. 39-49, 2014.

CARRIJO, Daniel Polonio. Estudo de metodologia e técnicas para execução de ensaios de resposta em frequência em transformadores de potência. 2009.

CHATTERJEE, Kingshuk et al. Novel prediction-reliability based graphical DGA technique using multi-layer perceptron network & gas ratio combination algorithm. IET Science, Measurement & Technology, v. 13, n. 6, p. 836-842, 2019.

CIGRE – JWG D1/A2.47. TB-771 – Advances in DGA Interpretation. D1/A2 Technical Brochure, 1. 2019

CRUZ, Vinicius GM; COSTA, Andre LH; PAREDES, Marcio LL. Development and evaluation of a new DGA diagnostic method based on thermodynamics fundamentals. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 22, n. 2, p. 888-894, 2015.

DUVAL, Michel. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 24, n. 6, p. 22-29, 2008.

DUVAL, Michel; DEPABLA, A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 17, n. 2, p. 31-41, 2001.

DUVAL, Michel; LAMARRE, Laurent. The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 30, n. 6, p. 9-12, 2014.

KHAN, Shakeb A.; EQUBAL, Md Danish; ISLAM, Tarikul. A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 22, n. 1, p. 590-596, 2015.

KIM, Sung-wook et al. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: application of gas-ratio combinations. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 20, n. 2, p. 685-690, 2013.

NOORI, Masoud; EFFATNEJAD, Reza; HAJIHOSEINI, Payman. Using dissolved gas analysis results to detect and isolate the internal faults of power transformers by applying a fuzzy logic method. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 11, n. 10, p. 2721-2729, 2017.

ROGERS, R. R. IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. IEEE transactions on electrical insulation, n. 5, p. 349-354, 1978.

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