

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Prof^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 Alfnas

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Prof^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

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

Prof^ª Dr^ª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão

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

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

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

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

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

Prof^ª Dr^ª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

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

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

Prof^ª Dr^ª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras

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

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

Prof^ª Dr^ª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

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

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

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

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

Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

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

Prof^ª Dr^ª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

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

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

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

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Prof^ª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

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

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

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

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-773-4

DOI 10.22533/at.ed.734212202

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

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

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

Data de aceite: 04/02/2021

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira

Universidade Estadual da Paraíba
João Pessoa - PB

Pedro Carlos de Assis Júnior

Universidade Estadual da Paraíba
Patos – PB

Relber Antônio Galdino de Oliveira

Universidade Estadual da Paraíba
João Pessoa – PB

RESUMO: As redes de Telecomunicações vêm passando por uma grande evolução em termos de cobertura, transmissão de dados e abrangência global, isso aliado aos altos investimentos nos setores de Tecnologia 4,5G, 5G e internet das coisas (IoT). A revolução que a internet 5G e o IoT promete nos oferecer é algo antes nunca imaginável, onde teremos tudo ou quase tudo conectados, desde casas inteligentes carros e até mesmo eletrodomésticos, tudo conectado em uma grande rede de Telecomunicações. Nesse contexto os arranjos de antenas de microfita devido às diversas características atrativas que as compõem, tais como: baixo peso, baixo perfil, conformidade a superfícies onduladas e principalmente um baixo custo associado, as tornam ponto de interesse dos pesquisadores na grande área do eletromagnetismo aplicado. O objetivo deste artigo consiste no projeto de um arranjo de antenas de microfita utilizando a curva fractal de Minkowski nível 2 no intuito de

se conseguir dimensões menores em relação a um arranjo de antenas de microfita retangular convencional. Também é realizado uma análise numérica e experimental desse arranjo para a faixa das micro-ondas em 2,44 GHz, pertencente a banda ISM - *industrial, scientific and medical*). O projeto foi suportado pelo *software* comercial *Ansys Designer™* para as simulações numéricas e posterior obtenção dos resultados eletromagnéticos associados ao arranjo proposto. A estrutura investigada será excitada pela técnica de linha de transmissão (TLM) em microfita, caracterizada fora de linha e terá seus diversos parâmetros de espalhamento analisados, dentre os quais se destacam: a perda de retorno (RL), diagrama de radiação, impedância de entrada, coeficiente de onda estacionária (VSWR) e sua largura de banda (BW).

PALAVRAS-CHAVE: Arranjo quase-fractal, Antenas de microfita, Comunicação sem fio.

ABSTRACT: Telecommunications networks have been undergoing a great evolution in terms of coverage, data transmission and global coverage, allied to high investments in the sectors of Technology 4,5G, 5G and internet of things (IoT). The revolution that the 5G internet and the IoT promises to offer us is something never before imagined, where we will have everything or almost everything connected, from smart homes to cars and even appliances, all connected in a large Telecommunications network. In this context, the arrays of microwave antennas due to the various attractive characteristics that compose them, such as: low weight, low profile, conformity to wavy surfaces and especially a low

associated cost, make them a point of interest for researchers in the large area of applied electromagnetism. The aim of this article is to design an array of microstrip antennas using the Minkowski fractal curve level 2 in order to achieve smaller dimensions compared to a microstrip conventional rectangular antenna array. A numerical and experimental analysis of this arrangement is also carried out for the microwave band at 2.44 GHz, belonging to the ISM band - industrial, scientific and medical). The project was supported by the commercial software Ansys Designer for numerical simulations and later obtaining the electromagnetic results associated with the proposed array. The investigated structure will be excited by the transmission line technique (TLM) in microstrip, characterized offline and will have its various scattering parameters analyzed, among which stand out: return loss (RL), radiation diagram, input impedance standing wave coefficient (VSWR) and its bandwidth (BW).

KEYWORDS: Microstrip antenna array, Microwave, Wireless communication.

1 | INTRODUÇÃO

Diversos são os avanços observados nos setores de Telecomunicações, seja para empresas ou mesmo para uso pessoal, onde temos aplicações para redes 4G, 4,5G e mais recentemente as tecnologias de 5° geração (5G), que aliado ao desenvolvimento da Internet das coisas (IoT) promete revolucionar a forma como nos comunicamos, geramos e transmitimos dados ou mesmo informação, a uma velocidade muito superior à já existentes e sem falhas. Para que isso seja possível, se faz necessário um grande investimento em tecnologia e desenvolvimentos de antenas para comunicação a altas frequências, onde a procura por dispositivos leves, compactos e versáteis, aliado a um custo cada vez mais atraente, vem impulsionando as pesquisas na grande área do eletromagnetismo aplicado.

Esse avanço tecnológico aliado as limitações de espaço nos equipamentos modernos, tornam as estruturas planares, com tecnologia de microfita muito atraente para possíveis aplicações nas mais diversas áreas de interesse (BALANIS, 1997). Tais dispositivos se apresentam como candidatos em potencial a aplicações em sistemas de comunicações móveis, uma vez que a miniaturização dos dispositivos e a operação em várias faixas de frequências são requisitos desejáveis aos aparelhos de comunicação modernos (BARROS, 2020). Neste mercado competitivo, o surgimento de novas tecnologias sem fio resulta em demandas crescentes por antenas compactas e/ou multibandas, que permitam, por exemplo, a união de diferentes tecnologias sem fio em dispositivos portáteis sem perda de desempenho e com funções de operação em várias faixas de frequências, por exemplo as faixas de 2,44 GHz, 5,3 GHz e 5,8 GHz para aplicações em comunicação sem fio.

Diversas técnicas de miniaturização dos dispositivos estão sendo estudadas e aplicadas envolvendo estruturas planares, são elas: i) utilização de substratos dielétricos de alta permissividade elétrica (OLIVEIRA, 2011), aumento do comprimento elétrico da antena por meio de otimização de sua geometria utilizando estruturas fractais (OLIVEIRA, 2008), (BARROS, 2020). Diversas são as aplicações que necessitam que o dispositivo

opere em mais de uma frequência, por exemplo, o telefone celular modo *dual-band* é um bom exemplo de dispositivo sem fio multifrequência. Essa operação *dual-band* para o caso do GSM (do inglês, *Global System for Mobile Communications*), envolve transmissão e recepção em 850 MHz e 1850 MHz. Este tipo de aplicação em duas frequências ao mesmo tempo é muito complicado de se conseguir utilizando uma tecnologia tradicional de antenas.

O uso da geometria fractal no projeto de arranjo de antenas apresenta vantagens em termos de miniaturização e a capacidade de operar em múltiplas bandas de frequência de ressonância com características de radiação similares (Benavides et al., 2018), (Rodrigues et al., 2016). Em comunicações de longa distância, uma antena com baixa capacidade diretiva deixa de ser atrativa, uma vez que é pouco eficiente e não atinge resultados esperados. Neste sentido, para contornar esse problema um arranjo de antenas proporciona um melhor desempenho, uma vez que por meio da radiação de seus elementos agregados, permite radiar o máximo da energia em uma direção particular e muito pouca em outras direções (GARG, et al., 2001). Dessa forma, uma maior concentração de energia em uma determinada região apresenta uma melhor capacidade de irradiação por parte da antena, consequentemente apresenta uma maior diretividade e um maior ganho quando comparado a uma antena patch retangular convencional (BALANIS, 1997).

Neste contexto, a busca por dispositivos cada vez menores e sem perda de desempenho vem impulsionando as pesquisas na área de telecomunicações e do eletromagnetismo aplicado, o qual é a proposta do Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada (GEMCA) da Universidade Estadual da Paraíba.

A seção II descreve a geração da curva de fractal de Minkowski. Na seção III é descrito a metodologia e a estrutura do arranjo de antenas proposto. Os resultados simulados e experimentais são apresentados na Seção IV. A seção V apresenta as conclusões desse artigo.

2 | CURVA FRACTAL DE MINKOWSKI

Toda a teoria por trás da geometria fractal pode muito bem ser empregada em projeto de antenas e arranjo de antenas de microfita, seja para se conseguir antenas com múltiplas ressonâncias ou mesmo antenas com dimensões reduzidas (OLIVEIRA, 2008).

O conceito de geometria fractal data da década de 1970 por meio do matemático e pesquisador francês Benoit Mandelbrot, na qual o mesmo mostrou um grupo de figuras com características bem particulares, onde as mesmas apresentavam divisão infinita com réplicas dessa divisão idênticas em sua totalidade, sendo sua dimensão fracionária (MANDELBROT, 1983).

Porém, foi com Puente et al. 1998 e demais pesquisadores, que essa geométrica ganhou bastante popularidade com aplicações de diversas curvas fractais em projeto de antenas planares com aplicações na faixa de frequência das micro-ondas. A aplicação

de uma curva fractal em projeto de antenas planares só se tornou viável por causa de duas características intrínsecas dessa geometria, sendo elas: i) a propriedade de auto similaridade, a qual é responsável pelo efeito de multifrequência das antenas, e ii) a propriedade de preenchimento do espaço que é responsável por aumentar o comprimento elétrico do elemento irradiante e conseqüentemente diminuindo assim a sua dimensão, o que deixa a antena mais compacta e propicia a muitas aplicações em dispositivos que requeiram baixo perfil.

Nesse artigo para a obtenção do nível 2 da curva de Minkowski foi feito uso do método IFS, conforme descrito em (OLIVEIRA, 2008).

A Equação (1) mostra as 8 (oito) transformações afins (q_i) necessárias que são utilizadas na geração da curva de Minkowski. A transformação utiliza o espaço do R^2 , com $q_i: R^2 \rightarrow R^2$, sendo dado por:

$$q_i(x, y) = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i \\ f_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

A Figura 1 ilustra os passos envolvidos no processo de construção da curva fractal de Minkowski de nível 1 a partir dos lados de um quadrado (forma inicial da curva). A curva de Minkowski de nível 1, será exatamente a forma geométrica do arranjo de antenas patches de microfita projetada para a faixa de frequência de 2,45 GHz.

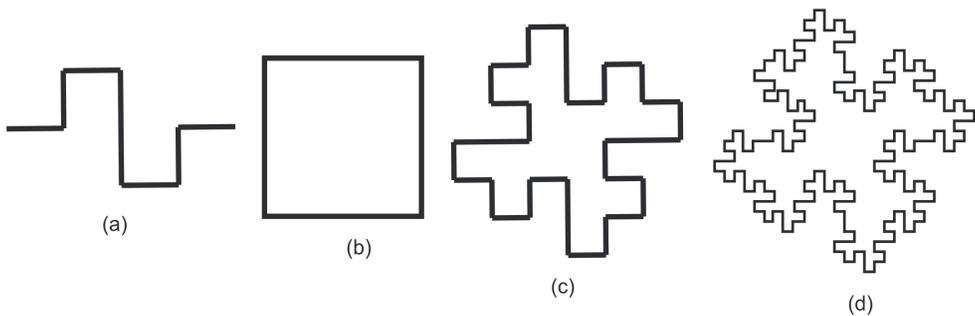


Figura 1 – Curva de Minkowski obtida por meio do método IFS. (a) curva geradora; (b) quadrado nível 0 da curva de Minkowski; (c) Curva de Minkowski nível 1; (d) Curva de Minkowski nível 2.

3 | METODOLOGIA EMPREGADA E ESTRUTURA DO ARRANJO DE ANTENAS FRACTAL PROPOSTO

Os principais procedimentos metodológicos envolvidos no projeto e análise do arranjo de antenas quase-fractal proposto passou diretamente pelo *software* simulador de onda completa *Ansys Designer™*, que implementa o método do momentos (MoM) por trás de sua interface gráfica, obedecendo os seguintes passos: i) Simulação da estrutura no

Ansys Design™; ii) Obtenção no simulador dos parâmetros de espalhamento largura de banda (BW), frequência de ressonância (F_r), coeficiente de reflexão (S11), impedância de entrada, diagrama de irradiação (2D e 3D) e coeficiente de onda estacionária (VSWR); iii) fabricação do dispositivo proposto; iv) Análise da estrutura no analisador de rede vetorial.

A Figura 2 (a) e (b) mostra respectivamente a estrutura do arranjo de antenas de microfita quase-fractal proposto e seu protótipo construído.

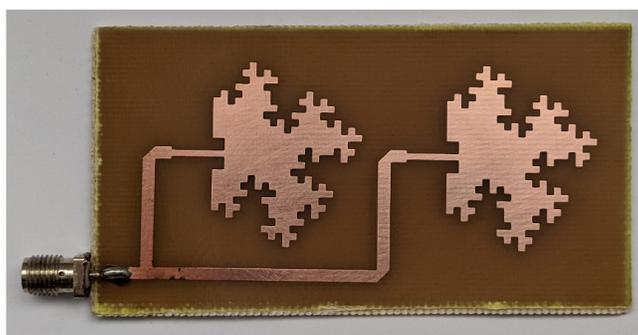
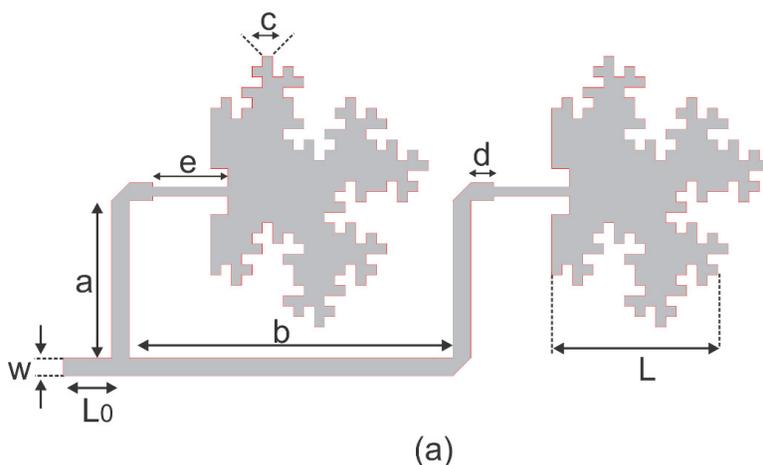


Figura 2 – Arranjo de antenas de microfita quase-fractal proposto: (a) Estrutura do arranjo com suas dimensões em milímetros; (b) Protótipo fabricado.

Uma vez projetado e otimizado no simulador, o arranjo quase-fractal passou pelas etapas de construção e caracterização experimental em um analisador de rede vetorial (modelo ZVB14 Rohde & Schwarz), onde teve seus parâmetros de espalhamento obtidos e conseqüentemente aferidos. Dessa forma é possível direcionar as possíveis aplicações dessa estrutura em sistemas de comunicação sem fio apenas observando as medições da sua frequência de ressonância e largura de banda. Vale salientar que para uma aplicação

em 2,44 GHz é necessário uma largura de banda mínima de 83,5 MHz.

O projeto do arranjo de antenas de microfita quase-fractal proposto, denominado aqui de AM2 foi obtido fazendo uso direto da geometria fractal de Minkowski em sua segunda interação, sendo sua obtenção conseguida por meio da aplicação da curva de Minkowski a um arranjo de antenas de microfita retangular (denominado aqui de A0) e logo em seguida ao arranjo de nível 1, conforme descrito em RODRIGUES et al. (2016) e em OLIVEIRA et al. (2020). A aplicação de uma estrutura complexa como é a geometria fractal de Minkowski, acaba por elevar o perímetro de todo o elemento irradiante do arranjo de antenas (Figura 2b), o que resultará em um maior comprimento elétrico e conseqüentemente uma diminuição da frequência ressonância da estrutura AM2. Esse fato de redução das dimensões em uma antena patch ou mesmo um arranjo de antenas patch de microfita é muito bem descrito em Oliveira (2008) e em Puente et al., 1998. Nesse contexto, foi pensado e executado um fator de correção que redimensionasse as dimensões do arranjo para a frequência de projeto inicial de 2,44 GHz. Para que isso pudesse acontecer, foi feito o cálculo do fator de compressão (CF) segundo a Equação (2) (OLIVEIRA, 2008).

$$CF = (Fr(GHz)/2,45 (GHz)) \times 100\% \quad (2)$$

O uso do fator de compressão resultou em novas dimensões para o arranjo de antenas quase-fractal proposto, acarretando dessa forma em um novo dispositivo com dimensões inferiores ao AM2, o qual denominamos de arranjo de antenas de microfita quase-fractal redimensionado, ou simplesmente AM2 mini, capaz de funcionar na frequência de projeto inicialmente desejada que é a banda de 2,44 GHz, onde temos inúmeras aplicações por meio de comunicação sem fio. Essa nova estrutura AM2 mini teve suas dimensões reduzidas em 38,3% quando comparada as dimensões do arranjo AM2, e essas dimensões em milímetros do arranjo AM2 e AM2 mini são mostrados na Tabela 1.

A interface gráfica do simulador *Ansys Designer™* pode ser visualizada na Figura 3 seguinte, onde mostra o arranjo AM2 mini sendo simulado. Por sua vez, a Figura 4 mostra o modelo de analisador vetorial mencionado neste artigo que foi utilizado para caracterização experimental dos dispositivos propostos.

Parâmetro	Dimensão (AM2 mini)	Dimensão (AM2)
L	17,7 mm	28,70 mm
d	2,46 mm	4,00 mm
L_0	5,16 mm	8,37 mm
W	1,92 mm	2,87 mm
e	8,01 mm	10,00 mm
c	1,1 mm	1,79 mm
L	17,7 mm	28,7 mm
a	16,70 mm	27,10 mm

Tabela 1 - Dimensões do arranjo de antenas quase-fractal AM2 e AM2 mini propostos.

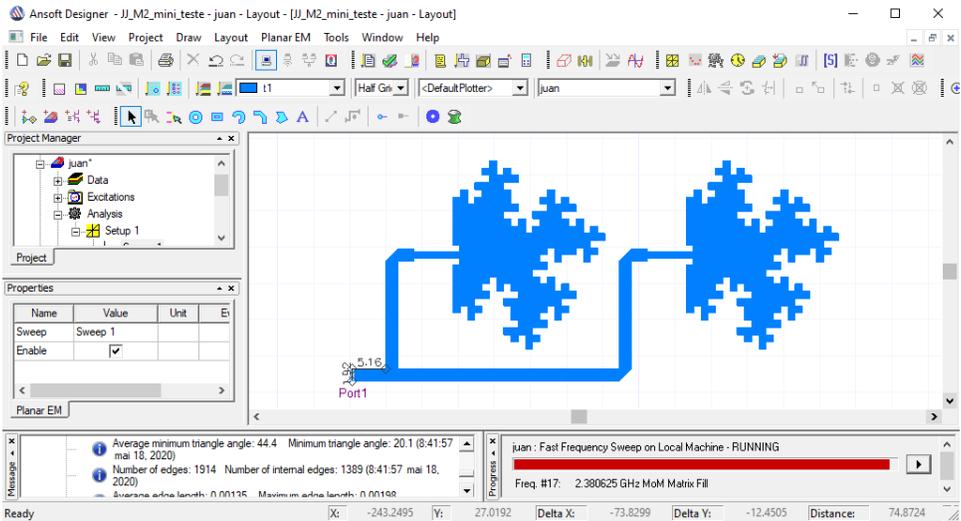


Figura 3 – Interface gráfica do *Ansys Designer™* empregado na simulação dos arranjos quase-fractal AM2 e AM2 mini.

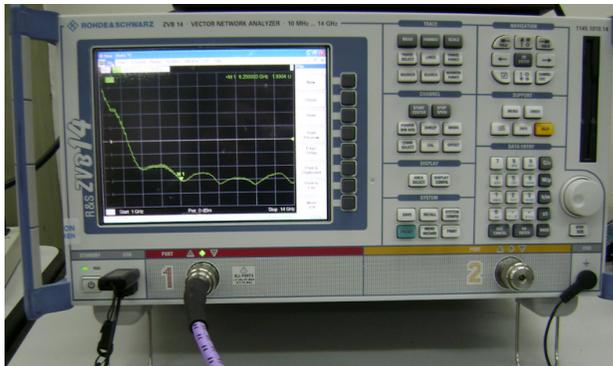


Figura 4 – Fotografia do analisador de rede utilizado na parte experimental e captura dos parâmetros de espalhamento.

4 I RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS PARA A ANTENA PROPOSTA

A parte final de todo procedimento metodológico utilizado para a construção e caracterização experimental do arranjo AM2 e AM2 mini propostos nesse artigo, consistiu em medições do arranjo de antenas no analisador de rede vetorial com o intuito de obtenção dos parâmetros de espalhamento (parâmetros S) associados a estrutura investigada. Vale salientar que na etapa de construção do arranjo foi utilizado uma placa baixo custo de fibra de vidro (FR-4), facilmente obtida no comércio de aparelhos eletrônicos, com as seguintes características: i) espessura ($h = 1,5$ mm), permissividade elétrica ($\epsilon_r = 4,4$) e tangente de perda ($\tan\delta = 0,02$). Um conector SMA de 50Ω de impedância foi utilizado para casamento das impedâncias envolvidas.

O primeiro resultado obtido no analisador de rede para o arranjo foi coeficiente de reflexão (S_{11}), o qual é dado pela Equação (3). Esse parâmetro relaciona as potências incidentes e refletidas nos terminais do dispositivo. (BALANIS, 1997).

$$RL = -20\log |S_{11}| \quad (3)$$

Assim, um resultado comparativo entre simulação obtida pelo simulador *Ansys Designer* e a medição obtida pelo analisador de rede vetorial é mostrado na Figura 5. Do resultado apresentado é possível constatar um comportamento multi frequência entre as frequências de 1,0 e 3,0 GHz para o arranjo AM2, isso em virtude de uma das características intrínsecas da geometria fractal quando aplicado a estruturas planares. Uma boa concordância entre simulação e medição foi observada, com baixas perdas de retorno, o que caracteriza um bom casamento de impedância para a estrutura analisada.

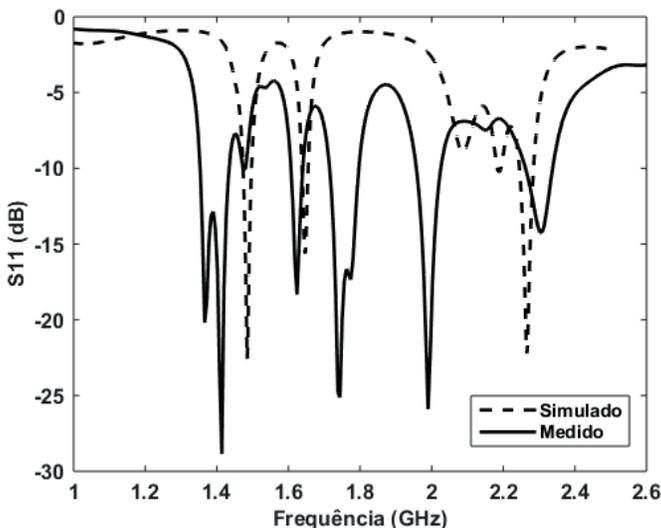


Figura 5 – Resultado comparativo em simulação e medição para o arranjo AM2.

O resultado do coeficiente de reflexão para o arranjo AM2 mini é mostrado na Figura 6. O resultado apresentou uma excelente concordância entre simulação e medição para essa estrutura. O arranjo apresentou baixa perda de retorno, o que caracteriza um bom casamento de impedância para o dispositivo analisado e uma ampla largura de banda de 100 MHz, superior ao mínimo exigido que é de 83,5 MHz para aplicações em sistemas de comunicação em fio na faixa de frequência de 2,44 GHz (banda ISM), o que torna esse arranjo bastante interessante a futuras aplicações nessa faixa de frequência.

O coeficiente de onda estacionária (VSWR) é um parâmetro que mede o quanto de energia está voltando ao gerador devido a um descasamento de impedância entre a linha de alimentação e o elemento patch irradiante (BALANIS, 1997). Esse parâmetro é dado pela razão entre os coeficientes de reflexão das ondas incidentes e refletidas, veja a Equação (4).

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (4)$$

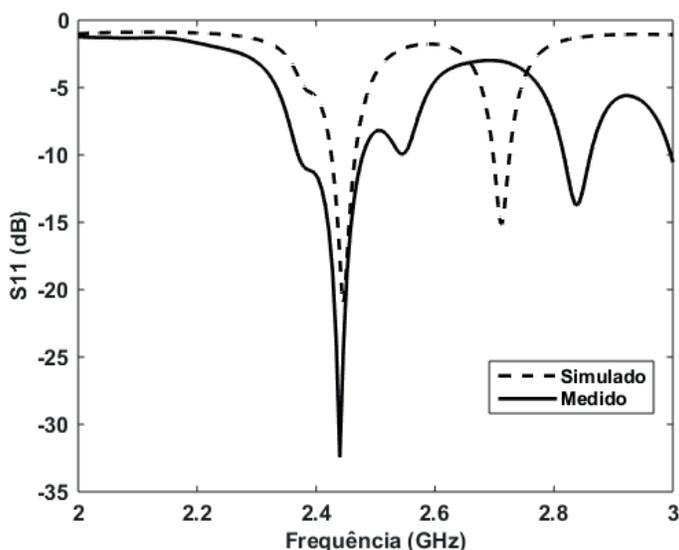


Figura 6 – Simulação e medição para o arranjo AM2 mini proposto.

A Figura 7 mostra a medição do parâmetro VSWR medido para o arranjo AM2 mini. Perceba que o valor medido foi de 1,06 bem abaixo da condição limiar que para um bom funcionamento de antenas que é um valor de VSWR igual 2,0.

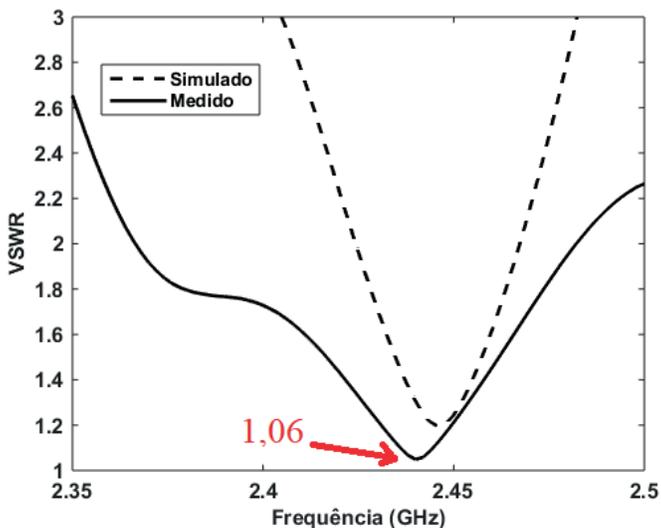


Figura 7 – Resultado medido e simulado de VSWR para o arranjo AM2 mini.

O resultado da Figura 8 mostra os diagramas de irradiação 2D (plano H) e 3D para o arranjo de antenas AM2 mini. É possível observar um diagrama de irradiação bem-comportado, sem deformações no seu feixe irradiado e com características direcionais. Pelo diagrama 3D vemos que o arranjo AM2 mini apresentou um ganho diretivo de 5,47 dB na direção *broadside* de campo distante, e pelo diagrama 2D, podemos constatar uma largura de feixe de meia potência (HPBW) de 120,01° no plano H.

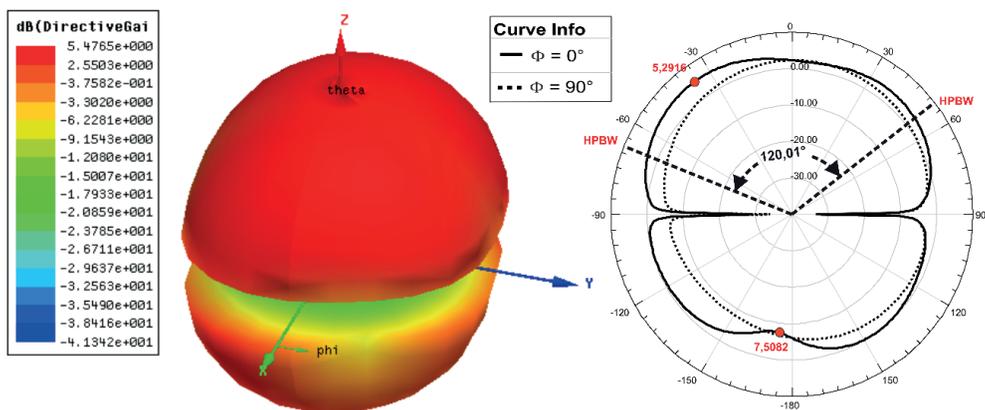


Figura 8 – Diagrama de irradiação 2D e 3D para o arranjo de antenas AM2 mini.

A Figura 9 mostra a distribuição de corrente de superfície para a estrutura analisada AM2 mini. Devido as características do próprio elemento irradiante (patch fractal de Minkowski), a corrente de superfície não se distribuiu por igual no elemento irradiante, se concentrando mais no hemisfério norte dos elementos patches do arranjo AM2 mini. Esse fato é provavelmente explicado pela característica assimétrica do elemento irradiante. Essa corrente de superfície foi obtida pelo simulador e o valor encontrado foi de 24,85 A/m².

Todos os resultados obtidos para o arranjo de antenas AM1 mini se encontram resumidos na Tabela 2.

Resultados	Arranjo AM1 mini	
	Simulado	Medido
Frequência de ressonância (F _r)	2,44 GHz	2,44 GHz
Perda de retorno (RL)	-21,0 dB	-32,5 dB
Largura de banda (BW)	40 MHz	100 MHz
Largura de banda percentual (BW%)	1,64%	4,1%
VSWR	1,20	1,06

Tabela 2 – Resultados simulados e medidos para o arranjo de antenas quase-fractal AM2 mini proposto.

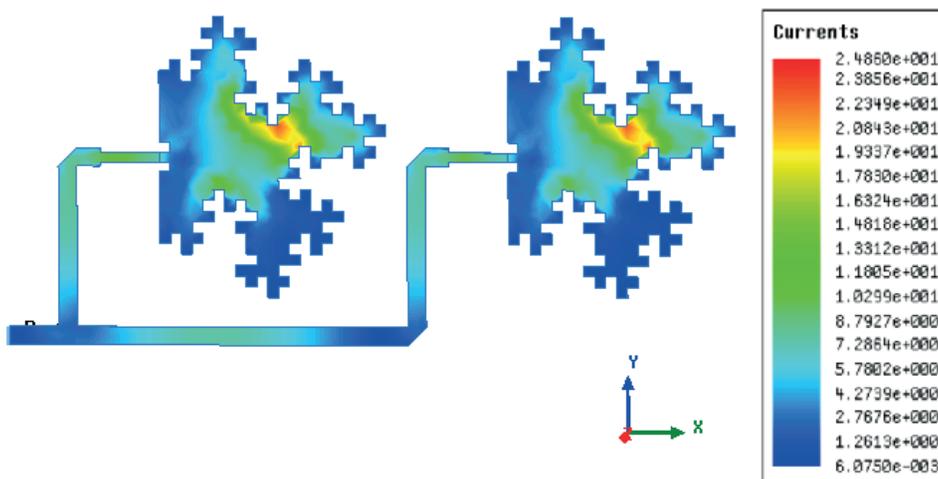


Figura 9 – Distribuição de corrente no arranjo AM2 mini proposto.

5 | CONCLUSÃO

Este artigo propôs o projeto e análise de um arranjo de antenas de microfita quase-fractal com dois elementos irradiantes excitados pela técnica de linha de microfita. A estrutura foi toda ela baseada na curva fractal de Minkowski na sua segunda interação. A

estrutura ressoou na frequência desejada no projeto que é a frequência de 2,44 GHz, onde é possível diversas aplicações nessa faixa de forma gratuita. O arranjo AM2 mini se mostrou propício a aplicações nessa faixa, uma vez que a mesma apresentou uma largura de banda satisfatória de 100 MHz e boas características de irradiação, a priori sem deformações em seu feixe irradiado com um comportamento direto.

O arranjo AM2 mini proposto neste artigo apresentou uma redução considerável em duas dimensões físicas quando comparado ao arranjo AM2 e ao arranjo de antenas AKQ0 então publicado em Rodrigues, et al. (2016). A redução conseguida para o arranjo AM2 mini foi de 38,3%. Um estudo comparativo de alguns parâmetros de espalhamento também foi realizado, onde podemos constatar uma excelente concordância entre os resultados dos coeficientes de reflexão simulados e medidos, com baixas perdas de retorno, caracterizando assim um bom casamento de impedância para essa estrutura. O resultado de VSWR também apresentou um bom comparativo com resultados bem abaixo do limite de funcionamento desse tipo de estrutura, que corresponde a um VSWR igual 2, o que corresponde a uma perda de retorno de -10 dB.

REFERÊNCIAS

BALANIS, C. A. **Antenna theory-analysis and design**, 2nd ed. USA: John Wiley & Sons, 1997.

BARROS, T. A. C. **Antenas de Microfita Fractais Quadrangulares para Aplicações em Comunicações Sem Fio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2020.

OLIVEIRA, E. E. C. **Desenvolvimento de Antenas de Microfita e Antenas DRA Broadband/Ultra Wideband para sistemas de Comunicação sem Fio Utilizando Pós Cerâmicos Nanoestruturados**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2011.

RODRIGUES, R. R. M. OLIVEIRA, E. E. C.; OLIVEIRA, M. A.; SILVA, P. H. F.; SILVA, R. C. F. **Projeto e Análise de um Arranjo Pré-Fractal de Antenas Tipo Patch em Microfita**, 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Porto Alegre, 2016.

BENAVIDES, J. B.; LITUMA, R. A.; CHASI, P. A.; GUERRERO, L. F. **A Novel Modified Hexagonal Shaped Fractal Antenna with Multi Band Notch Characteristics for UWB Applications**. IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2018.

GARG, R.; BHARTIA, P.; BAHL, I.; ITTIPIBOON, A. **Microstrip Antenna Design Handbook**, Boston, USA: Artech House, Inc., 2001.

OLIVEIRA, E. E. C. **Antenas de Microfita com Patch Quase-Fractal para Aplicações em Redes WPAN/WLAN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2008.

MANDELBROT, Benoit. **The Fractal Geometry of Nature**, New York: W. H. Freeman, 1983.

PUENTE, C.; ROMEU, J.; POUS, R.; CARDAMA, A. **On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna**, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, pp. 517-524, 1998.

OLIVEIRA, E. E. C.; ASSIS JR, P. C.; OLIVEIRA, R. A. G.; RODRIGUES, M. L.; BARROS, T. A. C. **Projeto Numérico e Experimental de Arranjo de Antenas de Microfita Utilizando a Geometria Fractal de Minkowski**. Publicação no livro eletrônico “Ciência, Tecnologia e Inovação: Desafio para um Mundo Global 4”, Ponta Grossa – PR, Editora Atena, 2020.

Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: www.ansoft.com.

MORETTI, Isabella. “Regras da ABNT para TCC: conheça as principais normas”. 2017. Disponível em: <https://viacarreira.com/regras-da-abnt-para-tcc-conheca-principais-normas>. Acesso em: 03/12/2020.

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