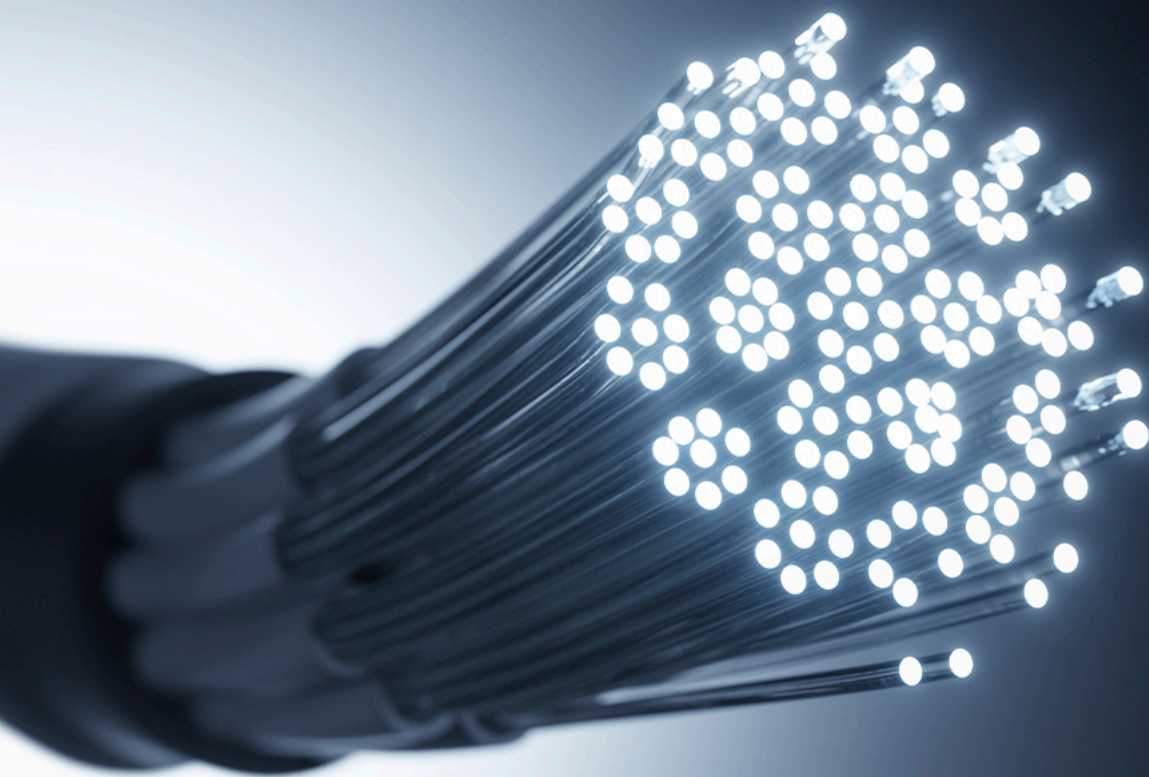


COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

**ENGENHARIA ELÉTRICA**



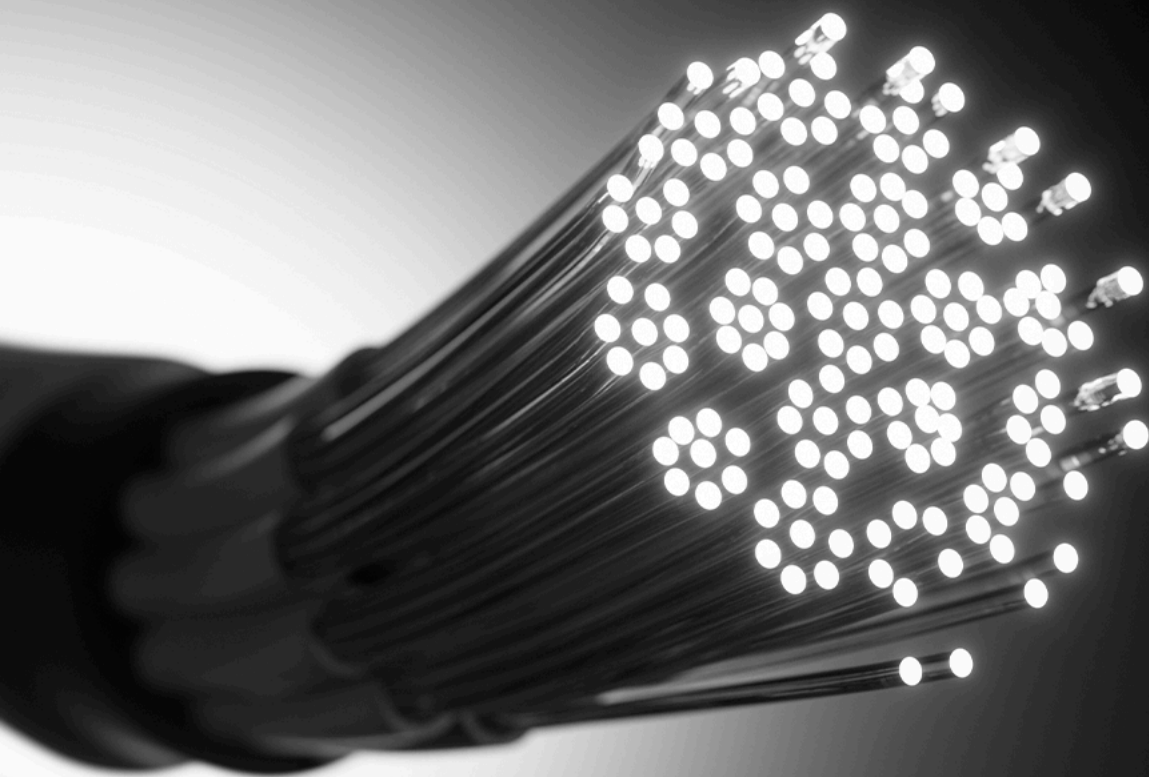
LILIAN COELHO DE FREITAS  
(ORGANIZADORA)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021



# COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

## ENGENHARIA ELÉTRICA



LILIAN COELHO DE FREITAS  
(ORGANIZADORA)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes editoriais**

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



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

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

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

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

**Conselho Editorial****Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília



Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí  
 Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
 Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
 Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília  
 Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
 Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
 Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
 Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
 Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
 Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
 Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
 Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México  
 Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
 Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
 Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
 Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso  
 Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
 Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí  
 Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador  
 Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
 Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

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

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

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

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra  
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia  
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino  
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

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

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro



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

#### **Linguística, Letras e Artes**

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

**Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica**

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
C691	Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5983-260-6 DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.606212207">https://doi.org/10.22533/at.ed.606212207</a>  1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.  CDD 621.3
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

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



## APRESENTAÇÃO

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

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

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

A todos, uma ótima leitura!

Lilian Coelho de Freitas

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

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

Fábio Muniz Mazzoni

André da Silva Barcelos

Antonio J. Marques Cardoso

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

### **CAPÍTULO 2..... 15**

#### **MÉTODOS MATEMÁTICOS DE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO: LÓGICA FUZZY**

Joelson Lopes da Paixão

Alzenira da Rosa Abaide

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

### **CAPÍTULO 3..... 39**

#### **UM ESTUDO SOBRE A ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES FUZZY**

Géferson Rodrigo Sabino Silva

Wallysonn Alves de Souza

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

### **CAPÍTULO 4..... 47**

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

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Diogo Marujo

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Alexander Molina Cabrera

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

### **CAPÍTULO 5..... 62**

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

Victória Oliveira Diaz de Lima

Matheus de Paula Gonçalves


Débora Hungaro Micheletti

Fernanda Bach Gasparin

Amanda de Araújo Drago

Aline Bavaresco dos Santos

Adriana Ferla de Oliveira

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

**CAPÍTULO 6..... 73**

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

Reinel Beltrán Aguedo

Paula de Tárzia Borba de França

Ania Lussón Cervantes

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

**CAPÍTULO 7..... 86**


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

Eloi Rufato Junior

Bruno Dias Camargo

Elison de Souza Moreira

Felipe de Souza Kalume

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

**CAPÍTULO 8..... 116**

**MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Bruno Tiago Carneiro Moraes

Felipe Cléber Silveira


Averton da Silva Portigo

Daniel Soares de Souza

Rafael José Fonseca Barbosa

Franciani Diniz Branco

Marcus Vinícius O. Braga

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

**CAPÍTULO 9..... 120**

**FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍTICA**

Paulo Fernandes da Silva Júnior

Ewaldo Eder Carvalho Santana

Paulo Henrique Bezerra de Carvalho

Danilo Diniz Meireles

Francarll Oliveira Moreno

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira

Pedro Carlos de Assis Júnior

Raimundo Carlos Silvério Freire

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

**CAPÍTULO 10..... 135**

**TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS DE PODA URBANA**


Eveline Trindade

Maristela Furman

Aline Bavaresco dos Santos

Dilcemara Cristina Zenatti

Adriana Ferla de Oliveira


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

**CAPÍTULO 11 ..... 143**

**SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM EMPRESAS TERCEIRIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Anderson Francisco Kaiser

Marcos Hister Pereira Gomes

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

**CAPÍTULO 12 ..... 158**

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

Primitivo Bacilio Hernández Hernández


Omar Michael Hernández García

Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Edward Paul Sueros Ticona

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

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 170**

**ÍNDICE REMISSIVO ..... 171**

## FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍPTICA

*Data de aceite: 01/07/2021*

**Paulo Fernandes da Silva Júnior**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís – Brasil.

**Ewaldo Eder Carvalho Santana**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís – Brasil.

**Paulo Henrique Bezerra de Carvalho**

Instituto Federal do Maranhão  
São Luís – Brasil.

**Danilo Diniz Meireles**

Faculdade NetCom  
São Luís – Brasil.

**Francarlli Oliveira Moreno**

Faculdade NetCom  
São Luís – Brasil.

**Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira**

Universidade Estadual da Paraíba, João Pessoa – Brasil.

**Pedro Carlos de Assis Júnior**

Universidade Estadual da Paraíba  
Patos – Brasil.

**Raimundo Carlos Silvério Freire**

Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – Brasil.

**RESUMO:** Neste trabalho são desenvolvidos filtros planares com geometria elíptica para aplicação nas bandas industrial, científica e médica e de redes locais sem fio, nas faixas de 1,6 GHz a 4,1 GHz, cobrindo as faixas propostas pelos protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b, construídos em fibra de vidro, material de baixo custo. No trabalho foi desenvolvida uma metodologia com a aproximação da frequência de ressonância a partir da área total do filtro. A variação da área do filtro pela excentricidade promove a variação da frequência de ressonância e da largura de banda. No desenvolvimento do projeto foram simulados e construídos três filtros com excentricidade de 0,3, 0,6 e 0,9, pelos resultados pode-se observar que a variação da excentricidade promoveu a variação da frequência de ressonância, largura de perda de retorno, e que o filtro com excentricidade de 0,9 apresentou rejeição nas bandas de frequência de operação dos filtros com valores de 0,3 e 0,6.

**PALAVRAS - CHAVE:** Filtros planares, geometria elíptica, excentricidade.

### BROADBAND MICROSTRIP FILTER WITH ELLIPTICAL GEOMETRY

**ABSTRACT:** In this work, planar filters with elliptical geometry are developed for application in industrial, scientific, and medical bands and in wireless local area networks, in the bands from 1.6 GHz to 4.1 GHz, covering the bands proposed by the protocols IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b, built in fiberglass, low-cost material. In the work, a methodology was developed with the approximation of the resonant frequency from the total filter area. The variation of the filter area by

the eccentricity promotes the variation of the resonant frequency and the bandwidth. In the development of the project, three filters were simulated and built with an eccentricity of 0.3, 0.6, and 0.9, from the results it can be observed that the eccentricity variation promoted the variation of the resonance frequency, return loss width, and that the filter with an eccentricity of 0.9 presented rejection in the operating frequency bands of the filters with values of 0.3 and 0.6.

**KEYWORDS:** Planar filters, elliptic geometry, eccentricity.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os filtros de microfita são estruturas planares, utilizadas em diversos circuitos sistemas de comunicação, operando em faixas de VHF, UHF e Microondas (BALANIS, 2016). O filtro elétrico pode ser compreendido como um quadropolo com a propriedade de selecionar determinadas frequências, rejeitando as demais, sendo utilizados em sistemas de telecomunicações WiFi, tecnologias de 3G, 4G, 5G, comunicação via satélite, aplicações militares, médicas e aparelhos domésticos (PERTENCE JUNIOR, 2003), (HONG, 2019), (CASIMIRO; EMÍDIO, 2003).

Os filtros podem ser divididos em duas categorias os quais levam em consideração os dispositivos em sua composição, como filtros (PERTENCE JUNIOR, 2003):

- Passivos, os quais não precisam de uma fonte externa para seu funcionamento e que utilizam apenas elementos passivos, como indutores, capacitores e resistores;
- Ativos, estes necessitam de alimentação externa para seu funcionamento, como os amplificadores operacionais.

Existem também uma qualidade de filtros chamado de planares, os quais utilizam estruturas planas, geralmente construídos na tecnologia de microfita, podendo assumir diversas geometrias. Uma estrutura em microfita possui um elemento condutor separado de um plano de massa por um dielétrico, e têm características de dimensões compactas, fácil integração em circuitos ou módulos de desenvolvimento, podendo ser multibanda, operando em mais de uma frequência de ressonância, em banda larga ou estreita, de baixo custo e ampla aplicação nos sistemas de telecomunicações, sensorimento, entre outros (HONG, 2019), (CRNOJEVIC-BENGIN, 2015), (HONG, 2011).

Uma das formas do uso da microfita como filtro é levar em consideração a distância entre os elementos condutores, o qual permite a atenuação de determinadas frequências do espectro do sinal de entrada ao mesmo tempo em que dá passagem para outras faixas de frequência (BALANIS, 2016). Em muitas aplicações, apenas uma faixa exclusiva de frequências tem real interesse e com esse propósito foram desenvolvidos dispositivos passivos, ou seja, os filtros de alta frequência, que têm como características fundamentais a seleção, eliminação ou separação de sinais com bandas de frequências diferentes. Nesse sentido, os filtros de microfita apresentam um papel bastante relevante



nos dispositivos sem fio, de rede e telefonia celular, algo que vem estimulando cada vez mais a sua miniaturização (HONG, 2019), (GOMEZ-GARCIA; GONG, 2014).

As pesquisas em filtros planares se destacam como resposta de banda passante dupla, que se utiliza de ressoadores com impedâncias do tipo degrau (SIR – *Stepped Impedance Resonator*), esses filtros de microfita apresentam linhas acopladas paralelas em banda larga (CHEN, et al., 2003). Trabalhos como o de (SATTHAMSAKUL, et al., 2008) utilizam multicamadas de filtros de microfita, que apresentam um conjunto de linhas acopladas. Na pesquisa de (CHEN et al. 2006) projetos de filtro de microfita tríplice, com uma carga de acoplamento intensa foram desenvolvidas. Um filtro de microfita baseado num ressonador indutivo de um quarto do comprimento de onda foi aplicado por (WEI; JAI; ZHU, 2011). Outras pesquisas levam trabalho com superfícies seletivas em frequência (FSS – *Frequency Selective Surface*) as quais tem estrutura com apenas uma camada de elemento condutor e uma ou mais camadas de dielétricos, dependendo do tipo de resposta desejada (SILVA JUNIOR, et al, 2017) (MUNK, 2003).

Neste trabalho são desenvolvidos filtros de microfita com simetria elíptica, em que a área do dispositivo funciona como um seletor de bandas de frequências, operando nas frequências entre 1,6 GHz a 4,1 GHz cobrindo frequência da banda ISM, e faixas de redes locais sem fio, nos protocolos do IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b. Este trabalho está dividido da seguinte forma: na seção 2 são abordados os materiais e métodos utilizados. Na seção 3 são apresentados os resultados simulados e medidos, com as devidas considerações; as considerações finais a respeito do projeto do filtro elíptico são apresentadas na seção 4.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Filtros

Um filtro é uma rede composta de duas portas, ou mais portas, que apresenta um conjunto de elementos de armazenamento de energia, que podem ser indutores, capacitores e linhas de transmissão. Tais dispositivos tem como finalidade a obtenção de frequências características dependentes, garantindo a transmissão de sinais requeridos em uma determinada banda de passagem ao mesmo tempo em que rejeitam ou atenuam na chamada banda de rejeição. Esse comportamento pode ser obtido por meio das mais diversas associações de capacitores e indutores. Verifica-se que blocos de capacitores DC bloqueiam baixos níveis de frequências ao mesmo tempo em que dão passagem para frequências mais altas. Já os indutores apresentam características opostas aos capacitores, uma vez que bloqueiam as frequências mais altas permitindo que baixas frequências passem por eles. Estes elementos recíprocos possibilitam diferentes configurações e a classificação de quatro tipos diferentes de filtros (WILLIAMS; ARTHUR; TAYLOR, 1995), (PERTENCE JUNIOR, 2003):

- Filtro Passa Baixas, onde há a passagem de frequências localizadas abaixo de uma determinada frequência de corte e o bloqueio das demais frequências;
- Filtro Passa Altas, onde há a passagem de frequências acima de uma determinada frequência de corte e o consequente bloqueio das demais frequências;
- Filtro Rejeita Banda (FRB), caracterizado pelo bloqueio de uma banda de frequências, determinada pelas frequências de corte superior e inferior, ao mesmo tempo que permite que todas as outras frequências;
- Filtro Passa Banda, com o comportamento oposto ao FRB, permite a passagem de uma banda de frequências, determinadas pelas frequências de corte superior e inferior, rejeitando todas as demais frequências.

Devido a todas estas especificações, os filtros demandam muito rigor e atenção para o cumprimento dos requisitos de sua implementação, como seletividade de frequência, tamanho, peso, confiabilidade e desempenho em vários ambientes (LIM, et al., 2002). A partir da energia irradiada pode-se selecionar frequências de ondas indesejadas, possibilitando a diminuição das interferências, o que permite algumas classificações entre os filtros, que os distinguem de acordo com seu comportamento e aplicação.

Existem diversas faixas de frequência de operação para o espectro eletromagnético, como a banda de Frequências Ultra Alta (*Ultra Hight Frequency* - UHF), cuja faixa vai desde 300 MHz até 3,0 GHz, dentre as quais podem ser destacados as frequências de uso dos canais em TV, a rede locais sem fio operando em 2,4 GHz, os canais para telefonia celular de 2G, 3G e 4G (SHENOI, 2005), (PAARMANN, 2001), (SILVA JUNIOR, et al, 2016), (SILVA JUNIOR, et al, 2016).

Assim como as antenas, os filtros necessitam de uma fonte de alimentação desenvolvida a partir das técnicas das linhas de transmissão a fim de excitar os dispositivos através de duas portas, conforme a esquema simplificado apresentado na Figura 1. Como observado o filtro possui duas portas,  $S_1$  e  $S_2$ , a partir delas é possível identificar os parâmetros como coeficiente de reflexão, que a potência que retorna do sistema para a porta  $S_1$ , designado como parâmetro  $S_{11}$ , e o coeficiente de transmissão, que é a potência que chega à porta  $S_2$ , identificado como  $S_{21}$ . Caso o sistema seja observado de forma contrária, como a porta  $S_2$  sendo a emissora, o parâmetro  $S_{22}$  mede o coeficiente de reflexão da porta  $S_2$  e o parâmetro  $S_{12}$  mede o coeficiente de transmissão da porta  $S_2$  para a porta  $S_1$ .

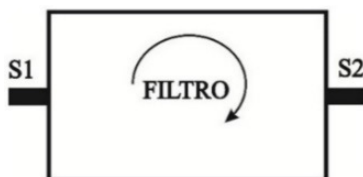


Figura 1- Filtro alimentado por duas portas  $S_1$  e  $S_2$ .

Um parâmetro importante no desenvolvimento dos filtros é o casamento das impedâncias entre a porta e o circuito, no caso de filtros planares, entre a fonte, a linha de alimentação e circuito. Os sistemas de comunicação, em maioria, operam com impedância real de  $50 \Omega$ , assim a linha de transmissão em microfita foram projetadas para uma impedância de  $50 \Omega$ , operando na frequência de 2,4 GHz. A frequência de ressonância central dos filtros propostos neste artigo foi criteriosamente proposta para a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz, permitindo sua classificação segundo os critérios dos padrões internacionais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11b (BIGGS; HENLEY; CLARKSON, 2004).

Os filtros foram projetados, simulados e construídos em dielétrico FR4, fibra de vidro, com permissividade elétrica ( $\epsilon_r$ ) de 4,4, tangente de perdas de 0,02 e espessura de 1,55mm, com duas faces de cobre com espessura de 0,035mm. As simulações foram realizadas no programa comercial *Ansys Designer™*. Os protótipos foram construídos e medidos no laboratório de medidas do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, no analisador de redes vetoriais da Agilent modelo S5071C (300 kHz–20 GHz).

## 2.2 Geometria Elíptica

No desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações, a geometria dos dispositivos planares, está diretamente relacionado à frequências de ressonância, largura de banda, ganho, polarização, dentre outros, assim a busca de formas que possibilitem parâmetros otimizados, em um ou mais parâmetros é fonte de pesquisa para diversos trabalhos, citando como exemplo temos os arranjos geométricos periódicos como os fractais, as formas bioinspiradas em plantas, uso de equações polares, dentre outros (KUMAR; PARIHAR, 2016), (SILVA JUNIOR, et al, 2019).

A forma geométrica elíptica foi desenvolvida pelo matemático Apolônio de Perga, no século II antes de Cristo, e está contida em um conjunto de curvas conhecidas como cônicas (CARL, 1968). Por muitos séculos essas curvas eram algo de interesse puramente matemático, porém, atualmente as cônicas são geometrias fundamentais nos mais diversos ramos da ciência e seu uso se tornou comum.

Uma elipse, conforme observado na Figura 2 é uma curva que apresenta pontos específicos em sua estrutura:

- Dois focos  $F_1$  e  $F_2$ , separados por uma distância de  $2c$ ;
- Eixo horizontal, que possui uma distância  $2a$ ;
- Eixo vertical, que possui uma distância  $2b$ , onde  $b^2 = a^2 (1 - e^2)$ , em que  $e$  é chamado de excentricidade, ou parâmetro medido pela divisão entre a distância  $c$  pela distância  $a$ .

A área de uma elipse é obtida pela expressão:  $A_{\text{elipse}} = \pi ab$ .

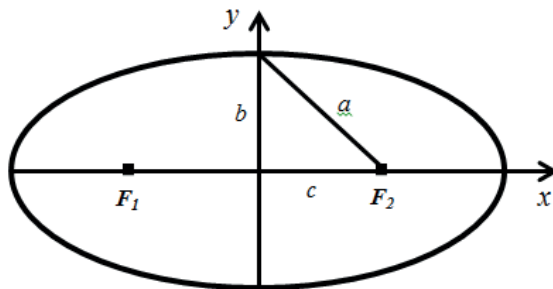


Figura 2 – Identificação dos principais parâmetros da elipse tomando o plano cartesiano como referência.

No desenvolvimento deste projeto foi utilizada a geometria elíptica para o plano superior, mantendo o plano terra sem deformações. A soma das duas regiões, que correspondem aos defeitos no plano superior do filtro, forma uma elipse completa. À medida que é alterado o valor da excentricidade ( $0 < e < 1$ ), modificamos a área das regiões com defeitos elípticos no plano superior do filtro. Essa técnica nos permite determinar um parâmetro de controle do comportamento em frequência do filtro, com variação determinada a partir da variação da excentricidade da elipse. Uma vez que a elipse estará inscrita ao retângulo, sua área total, pode ser calculada pela diferença:

$$A_T = A_R - A_{\text{elipse}}, \quad (1)$$

Dessa forma, para cada valor da excentricidade obtém-se elipses com áreas diferentes e consequentemente, a diferença entre a área do retângulo e a área da elipse causará efeitos diferentes no filtro. Para cada efeito temos um comportamento diferente para as bandas de frequências sendo possível estimar um valor específico para a excentricidade e garantir regiões passantes ou de rejeição para o filtro de microfita, desenvolvido a partir de uma região retangular pré-escolhida de área  $A_R = 2ab$ .

Na Figura 3 pode ser visualizada o plano superior do filtro elíptico com deformação elíptica. O plano inferior tem a função de plano de terra com a mesma área da placa retangular.

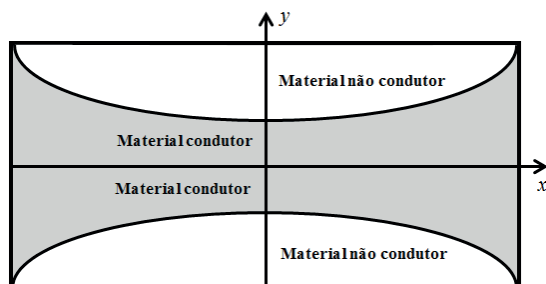


Figura 3 – Esquemático de um filtro com deformação elíptica.

### 3 I FILTRO ELÍPTICO RESULTADOS E DISCURSÕES

Os parâmetros de simulação foram determinados de maneira a garantir que a alimentação dos filtros elípticos fosse realizada por uma linha de microfita com largura ( $W_0$ ) de 1,5 mm de largura (com dimensão  $2b$   $W_0$ ).

Um cabo coaxial de 50Ω conecta-se à linha de alimentação do elemento patch através de um conector SMA, como observado na Figura 4. Os dados obtidos nestas simulações estão organizados na Tabela 1.

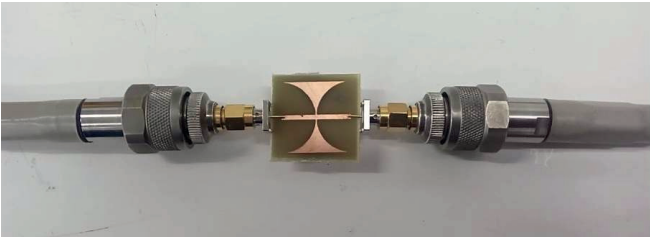


Figura 4 – Protótipo ligado com conectores SMA de 50 Ω.

Frequência Central (GHz)	Área Total (mm <sup>2</sup> )	Excentricidade (e)
2,17	103,87	0,0
2,18	105,77	0,1
2,36	111,55	0,2
2,68	121,38	0,3
2,72	135,60	0,4
3,02	154,78	0,5
3,54	179,89	0,6
4,12	212,53	0,7
3,46	255,92	0,8
2,80	318,31	0,9
0,00	484,00	1,0

Tabela 1 – Dados teóricos obtidos nas simulações sucessivas usando o parâmetro de excentricidade () como referência.

Os dados apresentados na Tabela 1 mostra que a banda ISM pode ser verificada para filtros elípticos com excentricidade que satisfaçam a variação:  $0,2 < e < 0,3$ . Após as simulações foi realizada a interpolação pela fórmula de Thiele (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1972), dada por:

$$F(x) = F(x_1) + \frac{x - x_1}{\rho_1 + \frac{x - x_2}{\rho_2 - F(x_1) + \frac{x - x_3}{\rho_3 - \rho_1 + (...)}}}, \tag{1}$$

em que  $\rho_n = \rho_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representa uma diferença recíproca, que tem a forma geral,

$$\rho_n = \frac{x - x_n}{\rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) - \rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)} + \rho_{n-2}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}); \quad (2)$$

Na Figura 5 podem ser visualizados os resultados interpolados pela fórmula de Thiele, calculados sem a linha de alimentação. Como observado a relação entre a excentricidade e a área se aproxima de uma relação exponencial.

A relação experimental entre a área total do filtro e a excentricidade do defeito elíptico, assumindo os dados da Tabela 1 para a área total e excentricidade,  $\{e_n, A_T(e_n)\}$  com  $n = \{1, 2, 3, \dots, 12\}$ , pode ser aproximada por:

$$A_T(e) \cong -\frac{922,4413657 [f_1(e) f_2(e) f_3(e)]}{f_4(e) f_5(e) f_6(e) f_7(e)}, \quad (3)$$

obtendo

$$\begin{aligned} f_1(e) &= e^2 + 0,006374794171 e + 0,6210340494; \\ f_2(e) &= e - 1,294165737; \\ f_3(e) &= e - 1,019517606; \\ f_4(e) &= e - 2,645825290; \\ f_5(e) &= e - 1,208368008; \\ f_6(e) &= e - 1,016025562; \\ f_7(e) &= e - 2,2402441925. \end{aligned} \quad (4)$$

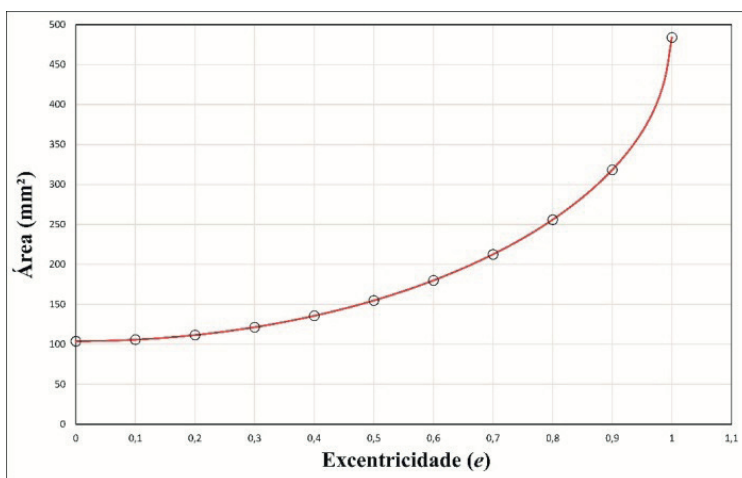


Figura 5 – Relação da área total do filtro pela excentricidade obtida pela interpolação dos pontos da Tabela 1.

A relação entre a área do filtro elíptico e a frequência central a partir dos dados da Tabela 1 e a Equação (2), pode ser indicada por:

$$f_r(A_T) \cong - \frac{0,8221132496 [f_1(A_T) f_2(A_T) f_3(A_T)]}{f_4(A_T) f_5(A_T) f_6(A_T)}, \quad (5)$$

obtendo,

$$\begin{aligned} f_1(A_T) &= A_T^2 - 559,1526099 A_T + 87442,29199; \\ f_2(A_T) &= A_T^2 - 227,8202856 A_T + 12977,87569; \\ f_3(A_T) &= A_T - 484,0000006; \\ f_4(A_T) &= A_T^2 - 468,3959701 A_T + 59338,51926; \\ f_5(A_T) &= A_T^2 - 228,3167764 A_T + 13033,16213; \\ f_6(A_T) &= A_T - 363,7682011. \end{aligned} \quad (6)$$

A combinação das Equações (5) e (6), desenvolvidas com o valor fixo de área  $A = 484 \text{ mm}^2$  para a placa com o material dielétrico na simulação, permite a aproximação da ressonância principal com uma precisão de aproximadamente 1,1%, em um intervalo de  $0 < f_r \leq 4,12 \text{ GHz}$ .

## 4 | RESULTADOS E DISCURSÕES

No desenvolvimento do projeto foi utilizado como valor inicial a frequência de ressonância ( $f_r$ ) de 2,45 GHz na Equação (6), que retorna o resultado  $A_T = 119,31 \text{ mm}^2$ . Substituindo este valor na Equação (5) encontra-se o valor para a excentricidade do filtro elíptico,  $e = 0,2271694825$ .

Na simulação do filtro foi usada uma placa quadrada de lado  $2B = 22 \text{ mm}$ , e inserido o efeito elíptico com os valores  $a = 11 \text{ mm}$  e  $b = 10,71240763 \text{ mm}$ , obtido a partir da excentricidade. As dimensões da linha de alimentação foram escolhidas de forma a garantir um bom casamento de impedância, apesar da miniaturização do filtro, com o comprimento da linha de microfita de  $2B$  e a largura  $W_o = 1,7 \text{ mm}$ .

Na Figura 6 pode ser observado o resultado simulado do coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) do filtro elíptico com parâmetros:  $A_T = 119,3059535 \text{ mm}^2$ ;  $a = 11 \text{ mm}$ ;  $b = 10,71240763 \text{ mm}$ ;  $2B = 22 \text{ mm}$  e  $W_o = 1,7 \text{ mm}$ , com a indicação de largura de banda (LB) e as dimensões da estrutura simulada e de uma moeda comparativa, de raio  $r = 12 \text{ mm}$ . O resultado obtido para esta simulação foi um filtro que opera na frequência central de  $f_r = 2,4230 \text{ GHz}$ , que corresponde a um erro de aproximadamente 1,1% em relação à frequência central pretendida para este primeiro teste com uma largura de banda, região para valores proibidos de frequência, de LBs = 1,99 GHz (1,76 – 3,76 GHz), englobando os 27 canais de operação oferecidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B. É importante frisar que

este excelente resultado só foi possível graças ao uso dos valores exatos das dimensões obtidas com o uso das Equações (4) e (5).

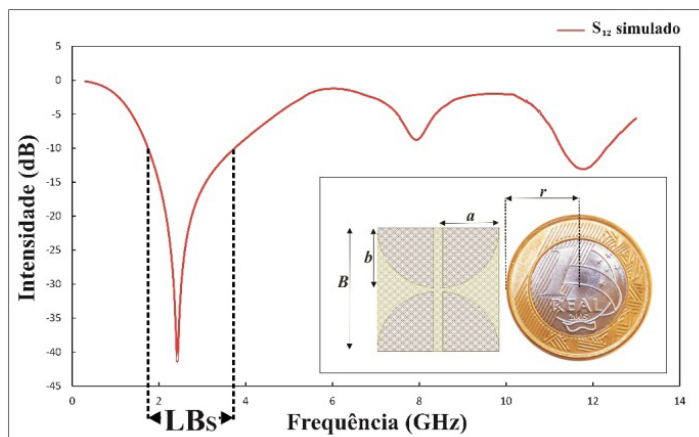


Figura 6 – Filtro Elíptico Simulado.

A partir dos resultados obtidos foram construídos três protótipos com valores de excentricidade:  $= \{0,3; 0,6; 0,9\}$ .

Na Figura 7 pode ser observado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão  $S_{21}$  do filtro elíptico com excentricidade  $e = 0,3$ , parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 10,493$  mm. Foi observada a frequência de ressonância simulada de  $f_r = 2,55$  GHz, contra  $f_r = 2,68$  GHz e  $LB_M = 2,55$  GHz (1,63 GHz – 4,179 GHz), com a diferença de 4,85% entre os resultados medido e simulado, cobrindo 27 canais indicados pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B. As diferenças entre os resultados medidos e simulados podem estar associadas ao método de construção, que foi o derretimento por percloroeto de ferro, ou pela característica da placa de FR4, que por ser baixo custo, não apresenta permissividade homogênea em toda sua estrutura.



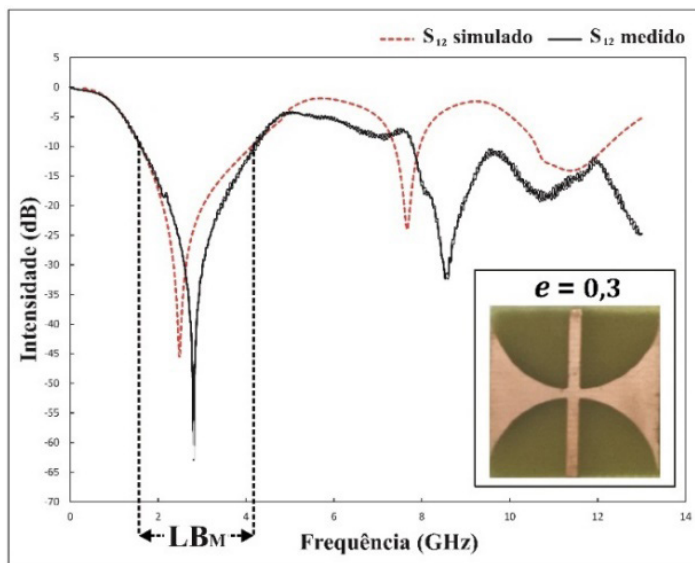


Figura 7 - Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) simulado e medido do filtro elíptico com  $e = 0,3$ .

Na Figura 8 pode ser visualizado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão, parâmetro  $S_{21}$ , do filtro com excentricidade  $e = 0,6$ , e parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 8,800$  mm. A largura de banda do filtro simulado é  $LB_S = 3,10$  GHz, com resultado medido de  $LB_M = 3,28$  GHz, a diferença de 5,49% na largura de banda, é esperada, visto que os protótipos, geralmente, apresentam valores de largura de banda medidos superiores aos simulados, com causa provável da variação da permissividade dielétrica do material. Pelos resultados pode-se observar uma variação entre a frequência de ressonância projetada, indicados na Tabela 1 de  $f_r = 3,54$  GHz, e medida de  $f_r = 4.27$  GHz, observada na Figura 8, de 20,62%, menor valor de perda de retorno no filtro medido, o que não foi observado no filtro com  $e = 0,3$ , e largura de banda cobrindo os canais indicados pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B.

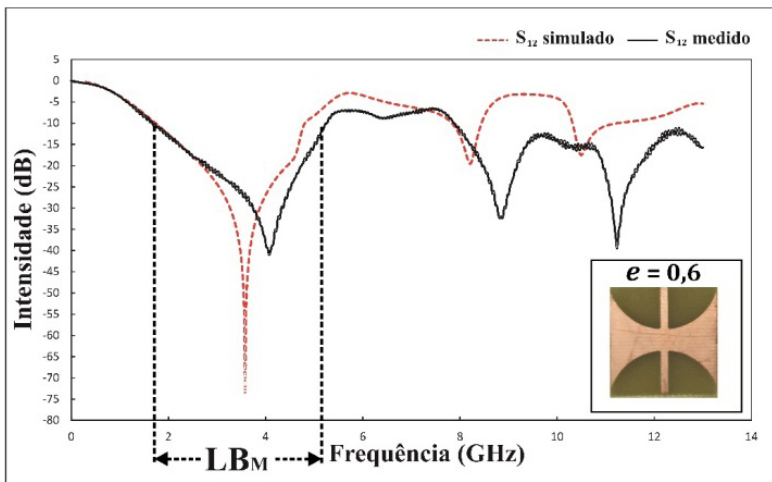


Figura 8 – Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) simulado e medido do filtro elíptico com  $e = 0,6$ .

Na Figura 9 pode ser visualizado os resultados simulados e medidos do coeficiente de transmissão, parâmetro  $S_{21}$ , do filtro com excentricidade  $e = 0,9$ , com os parâmetros  $2B = 22$  mm,  $a = 11$  mm e  $b = 4,795$  mm. Como observado para o filtro simulado não houve ressonância nas frequências propostas, indicando a rejeição da banda de frequências. O filtro medido apresentou pequena perda de retorno nas frequências indicadas, com de  $LB_M = 2,40$  GHz, e frequência de ressonância de  $f_r = 3,33$  GHz, porém isto pode ser atribuído às características dielétricas do material, que podem ter valor da tangente de perdas diferente do filtro simulado. O que pode ser observado é a rejeição da banda de frequências com a acentuação de frequências na faixa de 8 GHz.

Uma consideração sobre os filtros com geometria elíptica aplicadas ao projeto é que a variação da excentricidade tem efeito direto sobre a largura de banda, frequência de ressonância e na perda de retorno. Assim o filtro com  $e = 0,3$  medido obteve melhor perda de retorno que o filtro simulado com largura de banda próximas, porém o filtro medido com  $e = 0,6$  obteve maior largura de banda e menor perda de retorno que o filtro com  $e = 0,3$ , e quando comparado com o filtro com  $e = 0,9$  pode-se observar a rejeição da banda de frequências indicando que a variação da excentricidade promove a variação nos parâmetros de transmissão do filtro, o que pode ser utilizado em aplicações diversas.

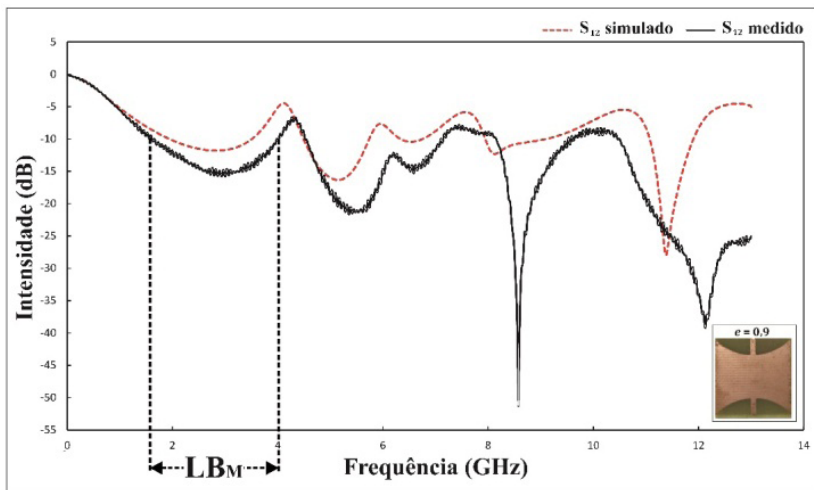


Figura 9 - Coeficiente de transmissão ( $S_{21}$ ) do filtro elíptico com  $e = 0,9$ .

## 5 | CONCLUSÃO

Neste artigo foram propostos filtros de microfita com geometrias elípticas, operando na banda ISM, de redes locais sem fio e cobrindo os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B, construídos em fibra de vidro, FR4, material de baixo custo. No desenvolvimento do projeto foram simulados e construídos três filtros com excentricidade de 0,3, 0,6 e 0,9, pelos resultados pode-se observar que a variação da excentricidade promoveu a variação da frequência de ressonância, largura de perda de retorno, e que o filtro com excentricidade de 0,9 apresentou rejeição nas bandas de frequência de operação dos filtros com valores de 0,3 e 0,6. Assim, pode-se observar a rejeição da banda de frequências indicando que a variação da excentricidade promove a variação nos parâmetros de transmissão do filtro, o que pode ser utilizado em aplicações diversas

## AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada (GEMCA), a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) pelo suporte técnico e laboratorial, a FAPEMA, a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA), a Universidade Federal de Campina Grande (UFPB), a FAPESQ-PB, e a Faculdade NetCom pelo financiamento para publicação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I. A. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 9<sup>th</sup>. New York: Dover, 1972.
- BALANIS, Constantine. *Antenna Theory Analysis and Design*. 4. Ed. New York: Wiley, 2016.
- BIGGS, M.; HENLEY, A.; CLARKSON, T. Occupancy Analysis of the 2.4GHz ISM Band. *IEEE Proceedings Communications*, vol. 151, 2004.
- CARL, B. B. *A History of Mathematics*. London: Wiley, 1968.
- CASIMIRO, A.; LOPES, V.; EMÍDIO, F. *Método dos Momentos*. Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade do Algarve, Algarve, Portugal, 2003.
- CHE, C. C.; KUO, J.; JIANG, M.; CHIN, A. Study of Parallel Coupled-Line Microstrip Filter in Broadband. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 48, 2006.
- CHEN, W. N.; WENG, M. H.; HUANG T. H., HUANG, T.; CHENG, C.; DAI, B. T.; Microstrip Coupled-Line Bandpass Filter With a Multilayer. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 39, 2003.
- CRNOJEVIC-BENGIM, V. *Advances in Multi-Band Microstrip Filters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- GOMEZ-GARCÍA, R., Gong X. Recent Trends on RF/Microwave Tunable Filter Design. *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 28-126, 2014.
- HONG, J. *Advances in Planar Filters Design*. London: SciTech Publishing, 2019.
- HONG, J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. 2<sup>nd</sup>. Hoboken: Wiley, 2011.
- KUMAR, L.; PARIHAR, M. S. Compact Hexagonal Shape Elliptical Low Pass Filter With Wide Stop Band, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, 2016.
- LIM, J. S.; KIM, C. S.; LEE, Y. T.; AHM, D.; NAUM, S., Design of Lowpass Filters Using Defected Ground Structure and Compensated Microstrip Line. *Electronics Letters*, vol. 38, 2002.
- MUNK, B. A. *Finite antenna arrays and FSS*. New York: Wiley, 2003
- PAARMANN, L. D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. London: Springer, 2001.
- PERNTECE JUNIOR, A. *Eletrônica Analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos, teoria, projetos, aplicações e laboratório*. 7<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- SATTHAMSAKUL, S., ANANTRASIRICHA, N., BENJANGKAPRASERT, C., WAKABAYASHI, T. Rectangular Patch Antenna with inset feed and modified ground-plane for wideband antenna, *SICE Annual Conference 2008*, 3400p.

SHENOI, B. A. Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design, John Wiley & Sons, 2005.

SILVA JUNIOR, P. F., SILVA FILHO, M. S. P. S. F., SANTANA, E. E. C., SILVA, P. H. F., OLIVEIRA, E. E. C. O., OLIVIERA, M. A., BATISTA, F. F., SERRES, A. J. R., FREIRE, R. C. S. F., NETO, A. S., NETO, S. A. A., CRUZ, C. A. M. *Fractal and Polar Microstrip Antennas and Arrays for Wireless Communications*. In: Mutamed Khatib. (Org.). *Wireless Mesh Networks - Security, Architectures and Protocols*. Krakow: IntechOpen, pp. 87-110, 2019

SILVA JUNIOR, P. F., FREIRE, R. C. S., SERRES, A. J. R., FREITAS SERRES, G. K., SOUSA, B. J. S., SILVA, P. H. F. Dual-Band Frequency Selective Surface with Angular Stability for WLAN Applications. In: *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, p. 377-381, 2017.

SILVA JÚNIOR, P. F., SILVA, P. H. DA F., SERRES, A. J. R., SILVA, J. C., FREIRE, R. C. S. Bio-inspired design of directional leaf-shaped printed monopole antennas for 4G 700 MHz band. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 1529-1533, 2016.

SILVA JUNIOR, P. F., FREIRE, R. C. S., SERRES, A. J. R., SILVA, P. H. F., SILVA, J. C. Wearable textile bioinspired antenna for 2G, 3G, and 4G systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 2818-2823, 2016

WEI, C. L.; JAI, B. F.; ZHU, Z. J.; Design of Triple-Mode Microstrip Filter with Source-Load Coupling. *Microwares and Optical Technology Letters*, vol. 53, 2011.

WILLIAMS, B. A.; ARTHUR, B.; TAYLOR, F.; *Electronic Filter Design Handbook*. McGraw-Hill, 1995.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Agronegócio 11, 45, 86, 87, 112

AMPL 10, 47, 48, 49, 52, 53, 55, 58, 59, 61

Arduino Uno 116, 117, 118

### B

Biocombustíveis Sólidos 62

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

### C

Canteiro de Obras 143, 144, 145, 150, 151, 152, 154, 156

Carbonização 62, 64, 68, 69, 71

Construção Civil 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 156

Consumo 11, 24, 63, 78, 83, 96, 98, 100, 101, 103, 108, 109, 112, 116, 117, 118

Controladores Fuzzy 10, 39, 44, 45

Cooperativa 143, 145, 148, 149, 151, 153, 156

Coproduto 135, 141

Corrente 1, 5, 12, 75, 80, 91, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 116, 117, 146

### D

*Dielectric Fluid* 159

### E

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

Energia Elétrica 11, 2, 24, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 61, 73, 74, 76, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 98, 100, 102, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 141, 150

*Environmental Management System* 159

Excentricidade 120, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132

### F

Filtros Planares 120, 122, 124

Fluxo de Carga 9, 10, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 61

Fontes Renováveis 24, 63, 87, 89, 114

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

## G

Geometria Elíptica 120, 124, 125, 131

## I

Identificação de falhas em rolamentos 1

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

## L

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

## M

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

Medidor 11, 116, 117, 118, 119

Motor de indução trifásico 1

## O

Otimização Matemática 47, 48, 49, 53, 61

## P

Pirólise 10, 62, 68, 135, 136

## R

Reconfiguração Automática 87, 89, 94, 114

Redes Inteligentes 86, 87, 88, 91

Resíduos Agroindustriais 62, 63

## S

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

Sistemas Elétricos de Potência 9, 10, 47

Sistemas Fotovoltaicos 9, 23, 73, 77

*Solver Knitro* 47

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

Sustentabilidade 27, 63, 73, 84, 86

## T

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

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

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

Transformadas no domínio tempo-frequência 1

*Transformer* 159

## **V**

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



# COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

## ENGENHARIA ELÉTRICA



[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)



[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



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



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

# COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

## ENGENHARIA ELÉTRICA



[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)



[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)



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



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