

Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



Atena
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

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

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª 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. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale 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
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª 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
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª 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
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª 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
Profª Drª 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
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª 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 Federacl 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 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 Miraniide 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

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
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª 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
Profª 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. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª 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. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
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
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
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/UFGA
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 Fenomenología & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lúvia 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
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª 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
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª 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
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª 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: o mundo sob perspectivas avançadas

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: o mundo sob perspectivas avançadas / 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 978-65-5983-013-8

DOI 10.22533/at.ed.138211305

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

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica 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. 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
FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN Carolina Barbosa Amaro Dias DOI 10.22533/at.ed.1382113051	
CAPÍTULO 2	14
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES Laura Vieira Maia de Sousa Paula Meyer Soares DOI 10.22533/at.ed.1382113052	
CAPÍTULO 3	30
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA UFAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE) Pedro Henrique Melo Costa Thiago Melo de Lima Antonio Carlos Alves de Farias Rennard de Oliveira Brito DOI 10.22533/at.ed.1382113053	
CAPÍTULO 4	44
ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF Licinius Dimitri Sá de Alcantara Mayara Soares Campos DOI 10.22533/at.ed.1382113054	
CAPÍTULO 5	57
TÉCNICA PREDITIVA DE SEGUIMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA GLOBAL DE ARRANJOS FV EM SOMBREAMENTO PARCIAL Paulo Robson Melo Costa Lucas Taylan Ponte Medeiros Isaac Rocha Machado Marcus Rogério de Castro DOI 10.22533/at.ed.1382113055	
CAPÍTULO 6	76
ANÁLISE DE TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V APLICADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS Ana Lyvia Pereira Lima de Araújo Arthur Vinicius dos Santos Lopes Adson Bezerra Moreira DOI 10.22533/at.ed.1382113056	

CAPÍTULO 7	94
METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO E MANEJO DE CARGA APLICADA A CONSUMIDORES RESIDENCIAIS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	
Andrei da Cunha Lima Laura Lisiane Callai dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.1382113057	
CAPÍTULO 8	113
ESTUDO DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DE ÚNICO ESTÁGIO COM CONEXÃO DIRETA AO SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO	
Lucas Taylan Ponte Medeiros Paulo Robson Melo de Costa Ângelo Marcilio Marques dos Santos Leonardo Pires de Sousa Silva Denisia de Vasconcelos Mota Adson B. Moreira	
DOI 10.22533/at.ed.1382113058	
CAPÍTULO 9	129
ESTUDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	
André Favetta Daniel Augusto Pagi Ferreira Maurício José Bordon	
DOI 10.22533/at.ed.1382113059	
CAPÍTULO 10	142
ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO.	
Neolmar de Matos Filho Dênio Alves Cassini Túlio Pinheiro Duarte Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.13821130510	
CAPÍTULO 11	156
THE IMPACT OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL ELECTRICAL PARAMETERS ON LIGHTNING OVERVOLTAGES DEVELOPED IN A 138 KV TRANSMISSION LINE	
Felipe Mendes de Vasconcellos Fernando Augusto Moreira Rafael Silva Alípio	
DOI 10.22533/at.ed.13821130511	
CAPÍTULO 12	170
A INFLUÊNCIA DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO SOBRE O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
Felipe Mendes de Vasconcellos	

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130512

CAPÍTULO 13..... 189

AVALIAÇÃO DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO NA RESPOSTA IMPULSIVA DO ATERRAMENTO E NAS SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Felipe Mendes de Vasconcellos

Fernando Augusto Moreira

Rafael Silva Alípio

DOI 10.22533/at.ed.13821130513

CAPÍTULO 14..... 207

CONVERSORES E INVERSORES PARA ACIONAMENTO E CONTROLE DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO

Moisés de Mattos Dias

Niklaus Veit Lauxen

Marco Antônio Fröhlich

Claudionor Atílio Vingert

Giuseppe Guilherme Mergener Vingert

Luiz Carlos Gertz

Alessandro Sarmiento dos Santos

José Lesina Cezar

Patrice Monteiro de Aquim

Jonathan Moling

Gabriel Mateus Neumann

Nickolas Augusto Both

Monir Goethel Borba

Lirio Schaeffer

DOI 10.22533/at.ed.13821130514

CAPÍTULO 15..... 221

ESTUDO DA TECNOLOGIA DE FRENAGEM REGENERATIVA E SEU IMPACTO NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ALIMENTADOS POR BATERIAS

Gabriel Silva de Marchi Benedito

Daniel Augusto Pagi Ferreira

DOI 10.22533/at.ed.13821130515

CAPÍTULO 16..... 238

PATH PLANNING COLLISION AVOIDANCE USING REINFORCEMENT LEARNING

Josias Guimarães Batista

Emerson Verar Aragão Dias

Felipe José de Sousa Vasconcelos

Kaio Martins Ramos

Darielson Araújo de Souza

José Leonardo Nunes da Silva

DOI 10.22533/at.ed.13821130516

CAPÍTULO 17.....	252
CONTROLE DE PRECISÃO PARA PRÓTESES MECÂNICAS	
Haniel Nunes Pereira Pinheiro	
Ronaldo Domingues Mansano	
DOI 10.22533/at.ed.13821130517	
CAPÍTULO 18.....	266
ESTUDO DA VIABILIDADE DO MEDIDOR DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA FLOW™ E ADAPTAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS	
Camila de Souza Gomes	
Ana Carolina Silva de Aquino	
Gabriela Haydee Mayer de Figueiredo Barbosa	
Maria Eduarda Santos Amaro	
Sergio Murilo Castro Cravo de Oliveira	
Lilian Regina de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.13821130518	
CAPÍTULO 19.....	280
OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO	
Gustavo Krause Vieira Garcia	
Antonio Lucas dos Santos Carlos	
Neemias Dantas Fernandes	
Taciano Amaral Sorrentino	
DOI 10.22533/at.ed.13821130519	
CAPÍTULO 20.....	297
ESTUDO DA SECAGEM SOLAR DE BIOMASSA DE LARANJA COM CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA	
Mariana de Miranda Oliveira	
Leandro Antônio Fonseca Domingues	
Andrea Lucia Teixeira Charbel	
DOI 10.22533/at.ed.13821130520	
CAPÍTULO 21.....	307
ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CAPACITOR TÉRMICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA	
Brenda Fernandes Ribeiro	
Antonio Gomes Nunes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130521	
CAPÍTULO 22.....	321
MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO TIPO GANGORRA DE EIXO ÚNICO	
Reinel Beltrán Aguedo	
Ricardo José de Farias Silva	
Ania Lussón Cervantes	
DOI 10.22533/at.ed.13821130522	

CAPÍTULO 23..... 335

DESSALINIZADOR SOLAR PORTÁTIL PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS NO RIO GRANDE DO NORTE

Paulo Vinícius de Souza Oliveira
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra
Luiz José de Bessa Neto
Vitória Caroline Carvalho do Nascimento

DOI 10.22533/at.ed.13821130523

CAPÍTULO 24..... 350

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DIDÁTICA COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS EM UM AMBIENTE DE CÓDIGO ABERTO - SCIENTIFIC LABORATORY (SCILAB)

Matheus Silva Pestana
Danúbia Soares Pires
Orlando Donato Rocha Filho

DOI 10.22533/at.ed.13821130524

CAPÍTULO 25..... 363

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO APLICADO A CONSTRUÇÃO CIVIL

Mauricio Andrade Nascimento
Ednildo Andrade Torres

DOI 10.22533/at.ed.13821130525

CAPÍTULO 26..... 391

MONITORAÇÃO REMOTA DE RESERVATÓRIOS LÍQUIDOS UTILIZANDO O MÓDULO ESP32-LoRa

Maria Eduarda Aparecida Gil
Thiago Timoteo Henrique
Getúlio Teruo Tateoki

DOI 10.22533/at.ed.13821130526

CAPÍTULO 27..... 397

S.A.C SISTEMA DE ASSISTÊNCIA AO CICLISTA

Ricardo Bussons da Silva
Alexandre Henrique Ferreira Rodrigues
Deivid Roberto Almeida Vasconcellos
Rian Guilherma Braga de Lima
San-Cleir Neto Silva Orlanlandes
Victor Manoel Rosa de Moraes

DOI 10.22533/at.ed.13821130527

CAPÍTULO 28..... 402

UMA ABORDAGEM BASEADA EM APRENDIZADO DE MÁQUINA E DESCRITORES ESTATÍSTICOS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Lucas de Oliveira Soares

Luiz Alberto Pinto
Diego Assereuy Lobão

DOI 10.22533/at.ed.13821130528

SOBRE OS ORGANIZADORES	415
ÍNDICE REMISSIVO.....	416

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO CAPACITOR TÉRMICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão: 04/02/2021

Brenda Fernandes Ribeiro

Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Engenharias
Mossoró – Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/0676153821236473>

Antonio Gomes Nunes

Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
Departamento de Ciências Naturais
Matemática e Estatística
Mossoró – Rio Grande do Norte
<http://lattes.cnpq.br/9984485183361630>

RESUMO: Este artigo propõe uma modelagem matemática para a distribuição de temperatura na superfície do capacitor térmico de um protótipo de secador solar de exposição indireta. Para a construção do modelo, foram utilizados dados empíricos de temperatura e irradiação solar de nove dias de experimentos realizados na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. A modelagem baseou-se na lei de Fourier da condução térmica e na resolução de uma equação diferencial parcial não homogênea – com condições de contorno e geração de energia dependentes do tempo e condição inicial dependente da posição – através do método de expansão em autofunções. A comparação de 27 dados experimentais com os dados equivalentes obtidos através do modelo revelou um erro médio percentual de 2,17% para todas as temperaturas

na unidade Kelvin.

PALAVRAS - CHAVE: Secador solar, Condução de calor, Modelagem matemática.

TEMPERATURE DISTRIBUTION ANALYSIS IN THE THERMAL ABSORBER OF AN INDIRECT SOLAR DRYER

ABSTRACT: This article proposes a mathematical modeling for the temperature distribution along a surface. The model was developed based on the Fourier's law of heat conduction and tested on empirical data obtained in 9 days of experiments performed on an indirect exposure solar dryer at UFCG (Campina Grande, PB, Brazil). The initial condition was considered position-dependent and the boundary conditions were considered position and time-dependent, as well as the heat generation equation added to the model to include the effects of solar irradiation. The application of Fourier's law of conduction resulted in a non-homogeneous partial differential equation, which was solved using the eigenfunction expansion method. The comparison between 27 experimental data and the equivalent data obtained through the model revealed an average percentage error of 2.17% for all temperature data given in Kelvin.

KEYWORDS: Solar dryer, Heat conduction, Mathematical modeling.

1 | INTRODUÇÃO

As aplicações de fontes de energia limpas, acessíveis e renováveis compõem um papel fundamental na promoção do desenvolvimento sustentável. Neste viés, Nunes (2016) propôs,

em sua tese de doutorado, o estudo de um secador solar de exposição indireta com vasto potencial de utilização, principalmente no setor frutífero.

O protótipo construído e estudado (NUNES, 2016) realizou com eficiência a secagem de bananas do tipo prata (*Musa spp.*) e operou através de energia solar fotovoltaica e térmica. Foram realizados quatro experimentos, tendo o primeiro uma duração de três dias e os demais de dois dias, totalizando nove dias de coletas de dados, que analisaram o intervalo das 8h às 16h. Foram registrados dados de temperatura e irradiação solar a cada hora de experimento. O presente artigo tenciona investigar, através do desenvolvimento de um modelo matemático e com base nos dados coletados, como ocorre a transferência de calor por condução através da placa que empenha o papel de capacitor térmico no coletor solar.

O coletor solar analisado tem como capacitor térmico uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco. Para a modelagem do problema, a telha foi considerada uma placa plana com condução unidimensional. Os dados experimentais de temperatura e irradiação solar foram utilizados na elaboração de uma equação diferencial parcial não homogênea com condições de contorno dependentes do tempo e condição inicial dependente da posição. Para que fossem inclusos os efeitos da irradiação solar, foi formulada uma equação de geração de energia térmica na telha variável com o tempo.

A resolução da equação diferencial parcial não homogênea foi feita através do método de expansão em autofunções – análogo ao método de variação de parâmetros aplicado em equações diferenciais ordinárias (FARLOW, 1982). O resultado final da resolução foi uma série de Fourier. Para a plotagem gráfica da resolução, realizada no software Mathematica, foram considerados os trinta primeiros termos da série. O erro médio percentual calculado para os dados de temperatura em Kelvin foi de 2,71%.

2 | MODELO MATEMÁTICO

2.1 Protótipo e experimentos

O secador solar de exposição indireta, elaborado e testado experimentalmente na secagem de frutas do tipo banana prata por Nunes (2016), possui como partes fundamentais: coletor solar – objeto de estudo do presente artigo –, câmara de secagem e sistema de medição de dados. A Figura 1 apresenta uma vista superior do protótipo com indicação de cada componente.

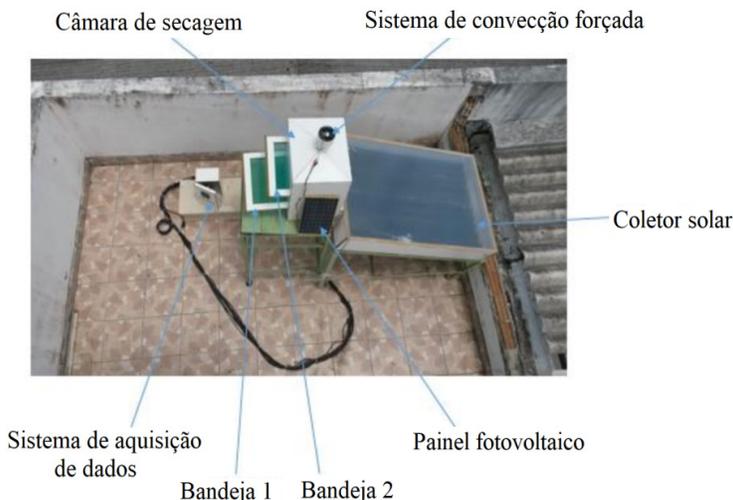


Figura 1 - Vista de cima do coletor solar com indicação de cada componente (NUNES, 2018).

Os testes com o protótipo foram realizados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), situado na cidade de Campina Grande no estado da Paraíba. Foram realizados quatro experimentos de secagem de bananas do tipo prata, tendo sido o primeiro realizado em três dias, com duração total de 24 horas, e os demais realizados em dois dias, com duração total de 16 horas cada. Os dados empíricos foram coletados nos dias: 12 a 14 de março; 26 e 27 de março; 28 e 29 de abril; e 26 e 27 de maio de 2015 no período compreendido entre as 8h00min e as 16h00min de cada dia.

Para a coleta dos dados de temperatura foram utilizados dez termopares, sendo seis distribuídos no coletor solar e quatro na câmara de secagem. Os dados de irradiação solar foram obtidos através da estação meteorológica do LEMT/UFCG (NUNES, GRILO, 2017) – modelo HD32MT.1, SN 11031486 e FW 0714141114. Também foram coletados dados de variações de massa das bananas e dados referentes à umidade e velocidade do ar de secagem.

2.2 Considerações de eixo de condução e formato da telha

O protótipo (Figura 2-a) é composto por uma bandeja de fibras de média densidade (MDF), uma telha de fibrocimento pintada de preto fosco de dimensões 0,7x1,25 m e uma cobertura de policarbonato alveolar. A presença da bandeja (Figura 2-b) e da cobertura de policarbonato implicam no isolamento da telha em dois eixos. Portanto, é cabível considerar que as variações de temperatura são mais significativas ao longo do eixo X (Figura 2-b), devido às aberturas de entrada e saída de ar da bandeja. Ao considerar a condução no coletor unidimensional, é possível, por aproximação, considerar, para fins de

análise térmica, o formato da telha (ondulada) como sendo uma placa plana.

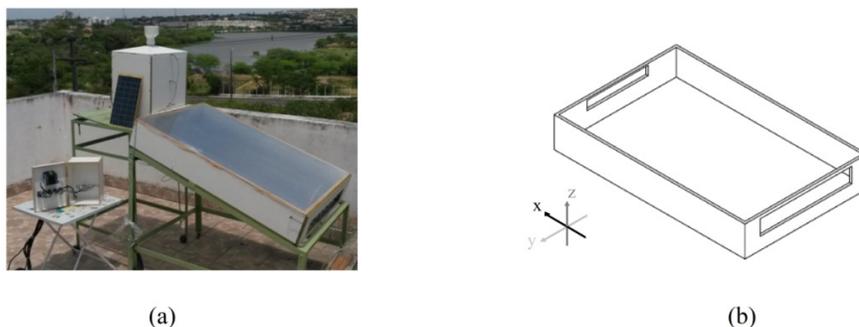
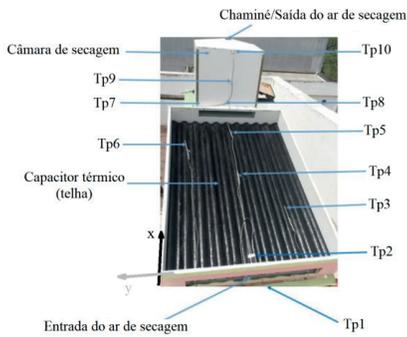


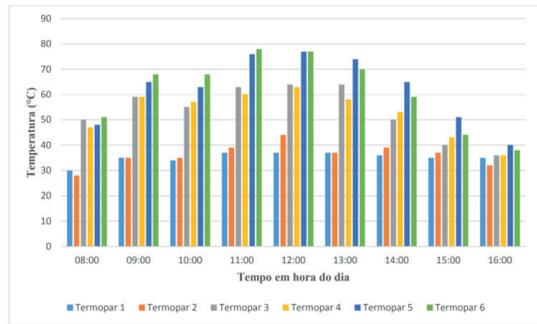
Figura 2 - (a) Protótipo de secador solar elaborado e estudado por Nunes (2018). (b) Desenho esquemático da bandeja que compõe o coletor solar do protótipo.

A validação da consideração de condução unidimensional é possível através da análise dos dados empíricos coletados: os termopares distribuídos ao longo do eixo Y na superfície da telha apresentaram, para um mesmo momento de medição, variações de temperatura bastante inferiores às observadas nos termopares distribuídos ao longo do eixo X .

A Figura 3 ilustra a distribuição dos termopares utilizados nos experimentos e as temperaturas medidas no coletor do secador solar para um dia de experimento. Os dados coletados revelam que as diferenças de temperatura entre os termopares $Tp5$ e $Tp6$ – que estão aproximadamente na mesma posição ao longo do eixo X , com variação em Y – são consideravelmente menores do que as variações nos termopares de mesma posição ao longo do eixo Y – com variação de posição em X –: $Tp2$, $Tp4$ e $Tp5$ para um período de experimento majoritário.



(a)



(b)

Figura 3 - (a) Indicação das partes do secador solar e da distribuição dos termopares utilizados nos experimentos. (b) Gráfico da distribuição de temperatura no coletor solar para um dia de teste experimental (26/03/2015).

2.3 Equação da condução de calor

A lei de Fourier da condução térmica estabelece que a taxa de transferência de calor (\dot{Q}) através de um meio é proporcional ao gradiente de temperatura e à área normal à direção da transferência (A) (ÇENGEL, 2012) – dada em m^2 . Para uma condução unidimensional ao longo do eixo X , tem-se, Eq. (1):

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde k (W/m.K) é uma constante de proporcionalidade denominada *condutividade térmica*, que varia de acordo com o material (ÇENGEL, 2012).

Para uma condução unidimensional com condutividade constante e geração de energia térmica (\dot{e}_{ger}) na placa, a equação em coordenadas retangulares torna-se, Eq. (2):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{e}_{ger}}{k} \right) \quad (2)$$

Onde α é a difusividade térmica do material, dada pelo quociente da condutividade (k) pelo produto entre densidade e calor específico do material ($\rho \cdot c$)

Para a elaboração da equação diferencial parcial referente ao caso estudado, a geração de energia foi considerada uma função variável com o tempo, assim como as condições de contorno. Todas as equações foram formuladas com base nos dados

experimentais coletados por Nunes (2016). As constantes k , ρ e c para o fibrocimento – material que compõe a telha estudada – foram extraídas da norma NBR15220 (ABNT, 2005).

2.4 Formulação das equações de condição inicial, condições de contorno e geração de energia

A equação diferencial parcial norteadora do problema modelado é dada pela, Eq. (3):

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + E(t) \quad (3)$$

Onde a difusividade térmica é dada por $\alpha = 0,0005952 \text{ m}^2/\text{s}$ (ABNT, 2005) e $E(t)$ corresponde à equação de geração de energia na placa, adotada para que fossem inclusos os efeitos da irradiação solar. A função $E(t)$ é diretamente proporcional à irradiação solar variante com o tempo $I(t)$ e à eficiência do coletor ε , e é inversamente proporcional à densidade e ao calor específico do fibrocimento – material que compõe a telha. Tem-se, portanto que, Eq. (4):

$$E(t) = \frac{1}{\rho c} \cdot \varepsilon \cdot I(t) \quad (4)$$

Para a densidade do fibrocimento foi adotado o valor $\rho = 1900 \text{ kg}/\text{m}^3$ (ABNT, 2005). O calor específico do fibrocimento foi considerado $c = 0,84 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ (ABNT, 2005). O valor adotado para a eficiência do coletor $\varepsilon = 19,89\%$ levou em consideração a média das eficiências calculadas por Nunes (2016) para cada experimento realizado.

Para a obtenção da função de irradiação $I(t)$ foram utilizados os dados de irradiação média coletados a cada hora nos nove dias de experimento (Tabela 1). Na função, a unidade de irradiação é W/m^2 e o tempo é dado em segundos. Foi considerado como tempo inicial o horário de início dos experimentos (8h00min).

Tempo (s)	Irradiação Solar (W/m ²)									
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	MÉDIA
0	400	430	675	680	575	675	670	370	430	545,000
3600	780	595	820	830	850	830	840	450	780	752,778
7200	980	790	720	720	1020	725	725	565	920	796,111
10800	980	1000	1000	1010	1050	1010	1005	810	900	973,889
14400	985	1000	980	970	950	980	980	750	660	917,222
18000	760	670	950	920	650	925	930	800	720	813,889
21600	820	420	780	775	650	780	780	410	630	671,667
25200	590	460	600	600	520	600	610	300	580	540,000
28800	225	225	260	270	240	270	260	200	190	237,778

Tabela 1 - Processamento dos dados experimentais de irradiação solar.

A equação de segundo grau obtida para $I(t)$ é dada pela Eq. (5) e possui coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,975.

$$I(t) = -2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0604 \cdot t + 547,9 \quad (5)$$

Substituindo os valores das constantes ρ , c e ε e a função $I(t)$, tem-se, a Eq. (6):

$$E(t) = \frac{1}{1900 \cdot 0,84} \cdot 0,1989 \cdot (-2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0604 \cdot t + 547,9) \quad (6)$$

As equações das condições de contorno foram determinadas através da análise e processamento dos dados dos termopares Tp1 e Tp7, que correspondem, respectivamente, à entrada do coletor (temperatura ambiente) e à saída do coletor (temperatura na entrada da câmara de secagem). Foram gerados polinômios de terceiro grau, que apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios.

A Tabela 2 relaciona os dados aplicados na formulação das equações de contorno $T_1(t)$ – elaborada através dos valores coletados para Tp1 – e $T_2(t)$ – elaborada com os valores de Tp7 – que, respectivamente, correspondem às temperaturas de entrada e saída do ar do coletor.

CONDIÇÃO DE CONTORNO: ENTRADA DO AR (Tp1)

Tempo (s)	Temperaturas (°C)									TEMPERATURA MÉDIA (K)
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	
0	27	28	29	30	27	29	26	29	27	301,15
3600	32	31	34	35	34	33	32	31	33	305,9278
7200	33	32	35	34	35	34	34	34	34	307,0389
10800	34	35	36	37	35	37	35	35	36	308,7056
14400	36	35	36	37	35	37	35	34	36	308,8167
18000	35	35	35	37	36	37	36	35	37	309,0389
21600	35	34	35	36	35	36	37	36	38	308,9278
25200	33	34	–	35	35	34	36	35	38	308,15
28800	33	34	33	35	34	–	36	–	36	307,5786

CONDIÇÃO DE CONTORNO: SAÍDA DO AR (Tp7)

Tempo (s)	Temperatura (°C)									TEMPERATURA MÉDIA (K)
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	
0	34	30	40	41	33	38	31	39	36	308,9278
3600	46	45	49	52	46	47	42	46	54	320,5944
7200	51	42	52	52	56	50	48	47	55	323,4833
10800	52	55	53	58	57	53	52	58	52	327,5944
14400	50	55	55	59	55	55	55	52	48	326,9278
18000	45	49	51	57	52	48	46	54	52	323,5944
21600	40	43	46	50	52	42	46	41	52	318,9278
25200	37	37	38	43	44	37	45	38	46	313,7056
28800	34	39	47	37	38	–	37	–	37	311,5786

Nota: Os dados omissos foram suprimidos por não haverem sido coletados ou por terem apresentado divergências incomuns.

Tabela 2 - Processamento dos dados experimentais para a formulação das condições de contorno.

Os polinômios $T_1(t)$ e $T_2(t)$ são dados pelas equações Eq. (7) e Eq. (8) e apresentam coeficientes de determinação respectivamente iguais a: 0,977 e 0,982. Nas equações, a unidade de temperatura adotada é Kelvin e o tempo é dado em segundos.

$$T_1(t) = 8 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 - 6 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 0,0012 \cdot t + 301,51 \quad (7)$$

$$T_2(t) = 3 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0,0037 \cdot t + 309,04 \quad (8)$$

A equação de condição inicial $\varphi(x)$ consiste em um polinômio de segundo grau definido pela relação entre a posição x e a temperatura inicial média φ para os nove dias de experimento dos termopares Tp2, Tp4 e Tp5 (Tabela 3).

TERMOPAR	TEMPERATURA MÉDIA EM $t = 0\text{s}$ (Kelvin)	DISTÂNCIA DA ENTRADA DE AR (m)
Tp2	302,5944	0
Tp4	314,9278	0,63
Tp5	314,4833	0,84

Tabela 3 - Dados referentes à condição inicial.

Por tratar-se de um polinômio de segundo grau traçado a partir de três pontos, a função $\varphi(x)$, que é dada pela Eq. (9), possui $R^2 = 1$.

$$\varphi(x) = -25,825 \cdot x^2 + 35,847 \cdot x + 302,59 \quad (9)$$

2.5 Modelo matemático e método de resolução da equação diferencial parcial

O modelo matemático proposto consiste, portanto, numa placa plana de comprimento $L = 1,25$ m com condução unidimensional ao longo do eixo X (Eq. 3), condições de contorno dadas por $T_1(t)$ (Eq. 7) e $T_2(t)$ (Eq. 8), condição inicial $\varphi(x)$ (Eq. 9) e geração de energia térmica $E(t)$ (Eq. 6). A Figura 4 ilustra esquematicamente o problema modelado.

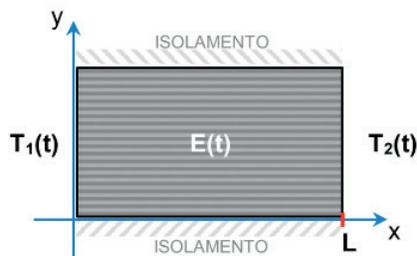


Figura 4 - Desenho esquemático referente à modelagem do problema.

A equação diferencial parcial formulada é não homogênea devido à consideração de geração de energia na telha. Além disso, as condições de contorno também são não homogêneas por não serem nulas. Para a resolução desta equação, foi necessário gerar uma segunda equação diferencial associada à primeira, entretanto com condições de contorno homogêneas. Para isso, a função $T(x, t)$ foi decomposta em uma equação de estado estacionário $S(x, t)$ – que define a distribuição de temperatura considerando-se uma situação de equilíbrio térmico na telha – e uma de estado transiente $U(x, t)$, tal que, Eq. (10):

$$T(x, t) = S(x, t) + U(x, t) \quad (10)$$

Onde:

$$S(x, t) = T_1(t) + \frac{x}{L} \cdot [T_2(t) - T_1(t)] \quad (11)$$

Desta forma:

$$T(x, t) = T_1(t) + \frac{x}{L} \cdot [T_2(t) - T_1(t)] + U(x, t) \quad (12)$$

Portanto:

$$U(x, t) = T(x, t) - \left\{ T_1(t) + \frac{x}{L} \cdot [T_2(t) - T_1(t)] \right\} \quad (13)$$

Para $U(t,x)$, as condições de contorno são nulas, ou seja:

$$U(0, t) = U(L, t) = 0 \quad (14)$$

Desta forma, a nova equação diferencial com condições de contorno nulas é dada pela Eq. (15):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + E(t) - \frac{\partial S}{\partial t} \quad (15)$$

Como condição inicial, tem-se:

$$U(x, 0) = \varphi(x) - S(x, 0) \quad (16)$$

A nova equação pode, então, ser resolvida através do método de expansão em autofunções, que é análogo ao método de variação de parâmetros utilizado na resolução de equações diferenciais ordinárias não homogêneas (FARLOW, 1982) por partir da resolução da equação homogênea associada à não-homogênea. No caso estudado, a equação homogênea associada é dada pela Eq. (17).

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (17)$$

Aplicando o método de separação de variáveis (ZILL, CULLEN, 2001), ou seja, para $U(x,t) = X_n(x) \cdot \Gamma_n(t)$, tem-se, a Eq. (18):

$$X_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (18)$$

Para que a função $\Gamma_n(t)$ seja encontrada, supõe-se uma função $f_n(t)$ tal que a parte não homogênea da equação diferencial parcial seja dada por, Eq. (19):

$$E(t) - \frac{\partial S}{\partial t} = F(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (19)$$

Multiplicando toda a equação por $X_n(x)$ e integrando ambos os lados de 0 a L com relação a x obtém-se $f_n(t)$, Eq. (20):

$$f_n(t) = \frac{2}{L} \cdot \int_0^L F(x, t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot dx \quad (20)$$

Desenvolvendo a equação diferencial com os termos encontrados, tem-se a Eq. (21) e Eq. (22):

$$\frac{\partial U}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - F(x, t) = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cdot \frac{\partial \Gamma_n(t)}{\partial t} - \alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial^2 X_n(x)}{\partial x^2} \cdot \Gamma_n(t) - \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \cdot X_n(x) = 0 \quad (22)$$

Portanto,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\partial \Gamma_n(t)}{\partial t} + \alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \Gamma_n(t) - f_n(t) \right] \cdot X_n(x) = 0 \quad (23)$$

Como $X_n(x)$ não possui valor nulo para todo x , tem-se na Eq. 23 uma equação diferencial ordinária que pode ser resolvida para que a função $\Gamma_n(t)$ seja determinada. O problema de valor inicial utilizado na resolução da EDO encontrada é determinado desenvolvendo-se a Eq. 16 de forma similar ao que foi feito com a Eq.(19). Desta forma, é encontrada a condição inicial $\Gamma_n(0)$ (Eq. 24).

$$\Gamma_n(0) = \frac{2}{L} \cdot \int_0^L [\varphi(x) - S(x, 0)] \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot dx \quad (24)$$

Resolvendo o PVI dado pela Eq. (24), tem-se a Eq. (25):

$$\Gamma_n(t) = \left[\frac{2}{L} \cdot \int_0^L [\varphi(x) - S(x, 0)] \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot dx \right] \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot t} + \left[\int_0^t e^{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot \tau} \cdot f_n(\tau) \cdot d\tau \right] \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot t} \quad (25)$$

O resultado final da resolução, em função das equações primárias $T_1(t)$, $T_2(t)$, $\varphi(x)$ e $E(t)$ e das constantes L e α , é dado pela série de Fourier expressa na Eq. (26).

$$T(x, t) = T_1(t) + \frac{x}{L} \cdot [T_2(t) - T_1(t)] + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{L} \cdot \int_0^L \left\{ \varphi(x) - \left[T_1(0) + \frac{x}{L} \cdot [T_2(0) - T_1(0)] \right] \right\} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot dx \right\} \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^t e^{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot \tau} \cdot \left\{ \frac{2}{L} \cdot \int_0^L \left[-\frac{dT_1(\tau)}{d\tau} - \frac{x}{L} \cdot \frac{dT_2(\tau)}{d\tau} + \frac{x}{L} \cdot \frac{dT_1(\tau)}{d\tau} + E(\tau) \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot dx \right\} \cdot d\tau \right\} \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \alpha \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (26)$$

2.6 Plotagem da solução e comparação com os dados experimentais

Para a representação gráfica da função encontrada $T(x, t)$, foram considerados os trinta primeiros termos da série de Fourier obtida – ou seja, as séries contidas na Eq. 10 tiveram n (inteiro) variando de 1 a 30. Como, ao longo da realização dos experimentos, a telha passou por processo de aquecimento seguido de resfriamento, foram elaborados dois gráficos que expressam a temperatura na telha – em Kelvin – em função da posição – em metros, medida com relação à entrada de ar do coletor.

O período de aquecimento da telha (Figura 5-a) ocorreu em torno das primeiras quatro horas de coleta de dados, ou seja, das 8h00min às 12h00min do dia, o que equivale a uma variação no tempo de experimento dada por $0 \leq t \leq 4h$. Já o período de resfriamento (Figura 5-b), que compreende as horas finais de cada dia de experimento, pode ser observado das 12h00min às 16h00min (horário de conclusão do período diário de medições), ou seja, para $5h \leq t \leq 8h$.

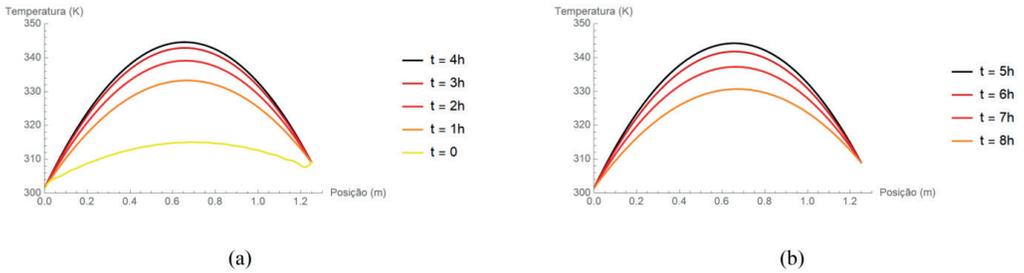


Figura 5 - Gráficos de temperatura (K) em função da posição (m) plotados no software *Mathematica* para os períodos de (a) aquecimento da telha e (b) resfriamento da telha.

O erro médio percentual $\epsilon_{\%}$ foi calculado através da Eq. (27). Os valores de referência para o cálculo do erro foram os dados experimentais dos termopares (Tp2, Tp4 e Tp5).

$$\epsilon_{\%} = 100\% \cdot \frac{\sum_{n=1}^{27} |T_n - T_{n \text{ exp.}}|}{27} \quad (27)$$

Onde T_n corresponde ao n ésimo valor de temperatura encontrado através da função $T(x,t)$ para a mesma posição x e tempo t do n ésimo valor experimental $T_{n \text{ exp.}}$. Como foram consideradas as temperaturas em nove momentos distintos para cada um dos termopares analisados (Tp2, Tp4 e Tp5), tem-se n variando de 1 a 27. Para efeitos de comparação, as linhas de tendências geradas com os dados experimentais são representadas nos gráficos da Figura 6.

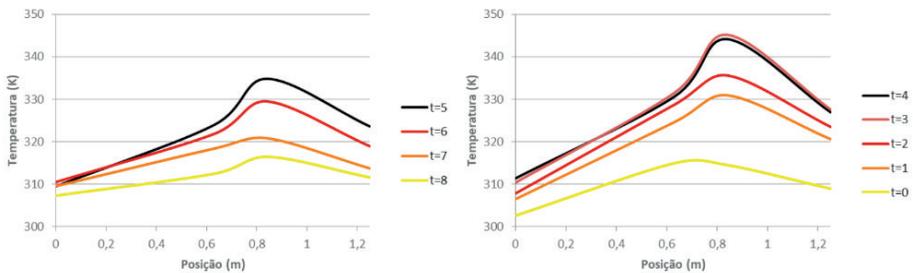


Figura 6 - Gráficos de temperatura (K) em função da posição (m). Linhas de tendência plotadas com base nos dados experimentais

O erro médio percentual foi de 2,71%, com valores que variaram entre 0,002% e 6,25% dentre os vinte e sete pontos avaliados. Todos os valores de erro calculados referem-se a temperaturas na unidade Kelvin.

3 | CONCLUSÕES

O modelo matemático proposto no presente artigo representou adequadamente a distribuição de temperatura na superfície do capacitor térmico (coletor) de um secador solar de exposição indireta. O erro percentual obtido para os dados empíricos coletados por Nunes (2016) foi inferior a 3%. Apesar de tratar-se de um erro expressivo para temperaturas na unidade Kelvin, as curvas obtidas com o modelo (Figura 5) e as curvas traçadas com os dados experimentais (Figura 6) se assemelham no que diz respeito a: o processo de aquecimento e resfriamento ao longo do dia; a posição do ponto mais quente da telha (próximo ao centro).

As considerações de condições de contorno e geração de energia no capacitor térmico dependentes do tempo e condição inicial dependente da posição tornam a aplicabilidade do modelo mais abrangente, não somente para condições meteorológicas diversas como também para outras situações de condução de calor que não a de um capacitor térmico de secador solar.

As considerações de condução unidimensional e a simplificação dos efeitos da radiação solar são fatores passíveis de aprimoramento, portanto, para trabalhos futuros, sugere-se a consideração de outras formas de transferência de calor (convecção e radiação), bem como a condução em dois ou três eixos a fim de obter-se um modelo matemático aprimorado que seja ainda mais fiel à realidade e possua um menor erro percentual.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 15220-2: Desempenho Térmico de Edificações** - parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

Çengel, Y.A. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática, 4ª Edição, Editora McGrawHill, 2012.

Farlow, S.J. **Partial differential equations for scientists and engineers**. Wiley, New York: Dover, 1982. 448p.

Nunes, A.G. et al., 2018. **Secador Solar usado na Secagem de Banana**, Gramado - Rio Grande do Sul, VII CBENS VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.

Nunes, A.G. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para secagem de frutas**. 2016. 175f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2016.

Nunes, A.G.; Grilo, M.B. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético**. 1. ed. Novas Edições Acadêmica, 2017. v. 1. 175p.

Zill, D.G.; Cullen, M.K. **Equações diferenciais**, vol. 2. São Paulo: Makron Books, 2001. 3ªa ed.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizagem 33, 238, 239, 251, 332, 350, 351, 352, 357, 359, 361, 362

ATP 156, 157, 158, 159, 170, 171, 173, 176, 177, 179, 189, 191, 192, 195, 196, 198, 255

Autonomia veicular 221

B

Backflashover 157, 163, 169, 170, 171, 172, 181, 182, 183, 184, 185, 190

C

Cargas Variáveis 76, 92

Célula fotovoltaica 61, 115, 116, 129, 145

Confiabilidade 2, 142, 143, 145, 151, 152

Conversores 8, 58, 59, 85, 86, 207, 208, 214, 216, 219

D

Dados Meteorológicos 38, 42, 44, 54

Descarbonização 14, 16, 17, 18, 23

Descargas Atmosféricas 156, 157, 170, 171, 174, 176, 183, 185, 189, 191, 193, 195, 204

Desempenho 5, 7, 6, 7, 47, 54, 76, 77, 78, 80, 86, 91, 92, 113, 117, 125, 127, 142, 145, 147, 151, 153, 157, 170, 171, 172, 176, 178, 185, 190, 197, 208, 212, 219, 224, 225, 226, 229, 232, 233, 234, 237, 251, 320, 321, 322, 323, 332, 348, 349, 395, 400, 402, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 413

Desenvolvimento 6, 1, 2, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 28, 30, 31, 37, 38, 42, 45, 51, 76, 94, 111, 114, 130, 143, 153, 208, 209, 212, 213, 219, 220, 223, 229, 236, 252, 258, 263, 264, 268, 269, 275, 277, 282, 289, 296, 307, 308, 320, 322, 323, 333, 334, 348, 351, 352, 357, 361, 364, 365, 367, 368, 370, 372, 374, 376, 388, 389, 391, 398, 400, 404

E

Eficiência Energética 6, 16, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 45, 209, 219, 222, 237, 363, 365, 367, 374, 378, 380, 387, 390

Energia fotovoltaica 7, 40, 77, 96, 113, 129, 130, 131, 135, 137, 374

Energia Solar 16, 30, 33, 34, 44, 45, 46, 47, 49, 51, 55, 56, 77, 78, 95, 130, 133, 138, 140, 141, 143, 152, 208, 219, 287, 294, 297, 298, 301, 308, 320, 335, 336, 337, 341, 344

F

Fontes Renováveis 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 77, 115, 131, 143

Frenagem Regenerativa 8, 221, 222, 223, 236, 237

G

Geração de Trajetória 239

GMPPT 57, 58, 75

I

Inversores 8, 136, 138, 207, 208, 210

Irradiação Incidente 44, 55

M

Manipulador Robótico 238, 239

Módulo fotovoltaico 62, 76, 77, 78, 84, 90, 91, 117, 119, 129, 131, 145, 146, 150, 151, 290

Módulos Fotovoltaicos 7, 33, 34, 61, 62, 63, 76, 77, 79, 83, 92, 99, 107, 110, 117, 122, 124, 130, 131, 135, 142, 143, 145, 146, 147, 149, 151, 152, 153

P

Painéis Fotovoltaicos 7, 44, 47, 51, 55, 76, 77, 83, 97, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 139, 140

Parâmetros elétricos do solo 156, 170, 171, 172, 180, 181, 182, 184, 185, 191, 198, 200, 201, 203

Permissividade do solo 157, 171, 178, 185, 189, 190, 197, 203

Pesquisa 5, 6, 23, 25, 29, 30, 31, 34, 37, 40, 41, 42, 43, 56, 96, 132, 143, 152, 222, 266, 268, 276, 277, 278, 298, 305, 350, 352, 362, 371, 372, 375, 379, 381, 382, 398, 400, 404

Planejamento de Caminho 239

Prevenção de Colisão 239

Q

Qualidade de Energia 41, 113

R

Reforço 238, 239, 361

Resistividade do solo 156, 157, 170, 171, 172, 173, 177, 181, 182, 183, 184, 185, 189, 190, 191, 192, 193, 196, 198, 200, 203, 204

Robótica 1, 251

S

Sensores 6, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 39, 40, 58, 59, 66, 80, 104, 105, 119, 208, 287, 288, 289, 290, 300, 396, 403

Setor Elétrico 6, 14, 24, 25, 26, 27, 37

Sinais 1, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 28, 105, 213, 215, 216, 254, 256, 259, 266, 267, 271, 275,

279, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 412

Sistemas de aterramento 157, 170, 171, 177, 190, 191, 196, 198, 203

Sistema Solar Fotovoltaico (FV) 113

Sombreamento Parcial 6, 57, 58, 60, 62, 64, 65, 74, 84

SPPMG 57, 58, 59, 60, 63, 70, 71, 72, 73, 74

T

Topologia de Estágio Único 113, 122, 126

Traçador de curva I-V 6, 76, 77

Transição Energética 6, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29

Trilhas de Caracol 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153

V

Veículo Elétrico 8, 207, 208, 209, 210, 212, 217, 219, 221, 222, 223, 224, 236, 237

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br