

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. Eloi 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 Silvío 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 eletricista 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

CAPÍTULO 10

ESTUDO DAS CAUSAS DE SNAIL TRAILS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: REVISÃO.

Data de aceite: 01/05/2021

Data de submissão: 05/02/2021

Neolmar de Matos Filho

Pontifícia Universidade Católica de MG / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Centro Federal de Educação Tecnológica de MG – Belo Horizonte – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7489676045597472>

Dênio Alves Cassini

Pontifícia Universidade Católica de MG / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte – Minas Gerais.
<http://lattes.cnpq.br/9560404918399346>

Túlio Pinheiro Duarte

Pontifícia Universidade Católica de MG / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte – Minas Gerais.
<http://lattes.cnpq.br/2956897481921887>

Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Grupo de Estudos em Energia PUC Minas, Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte – Minas Gerais.
<http://lattes.cnpq.br/8490362090746813>

RESUMO: Neste artigo busca-se realizar uma revisão da literatura. Com o objetivo de encontrar artigos que descrevessem ações,

entre os profissionais em sistemas fotovoltaicos. Que apresentaram resultados satisfatórios no processo de aprendizado sobre Trilhas de Caracol em módulos fotovoltaicos de silício cristalino e suas consequências. A geração de energia nos módulos fotovoltaicos depende de seus diferentes modos de degradação. Afetando a confiabilidade e a vida útil de um gerador fotovoltaico. Em face disto, justifica-se a realização deste estudo por permitir aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento de um sistema fotovoltaico. Com o passar dos anos, sobretudo devido ao impacto na produção de energia elétrica pelo gerador fotovoltaico, em função das degradações advindas das snail trails nos módulos fotovoltaicos de silício cristalino. Uma vez que a maioria dos módulos fotovoltaicos implementados no mundo utilizam o silício. Esta revisão fornece uma lista abrangente das publicações sobre o assunto entre os anos de 2013 a 2019, coletadas no portal de periódicos da CAPES/MEC e também no IEEE.

PALAVRAS - CHAVE: Módulos Fotovoltaicos, Trilhas de Caracol, Desempenho, Confiabilidade.

STUDY OF THE CAUSES OF SNAIL TRAILS IN PHOTOVOLTAIC CRYSTALLINE SILICON MODULES: REVIEW

ABSTRACT: This article seeks to conduct a literature review. In order to find articles describing actions, among professionals in photovoltaic systems. The article presented satisfactory results in the learning process about snail trails in crystalline silicon photovoltaic modules and their consequences. The generation of energy in

the photovoltaic modules depends on their different degradation modes, which affects the reliability and service life of a photovoltaic generator. In view of this, this study is justified because it allows to deepen the knowledge about the behavior of a photovoltaic system. It has happened over the years, mainly due to the impact on the production of electric energy by the photovoltaic generator, due to the degradation caused by the snail trails in the crystalline silicon photovoltaic modules. Since most of the photovoltaic modules implemented in the world use silicon, this review provides a comprehensive list of publications on the subject between the years from 2013 to 2019, collected on the CAPES / MEC journal portal and also on the IEEE.

KEYWORDS: Photovoltaic modules, Snail Trail, Degradation, Performance, Reliability.

1 | INTRODUÇÃO

A energia é sem dúvida um importante elemento para o desenvolvimento socioeconômico em uma sociedade. Com o constante aumento no consumo de energia pela população mundial, a pesquisa por fontes renováveis são assuntos atuais e necessários. Dentre as mais relevantes fontes renováveis existentes, a energia solar fotovoltaica destaca-se, pois não polui o meio ambiente, é praticamente inesgotável, silenciosa, não consome combustível e pode gerar energia elétrica.

Com o amadurecimento e tempo de instalação mais longos, o mercado fotovoltaico está se tornando altamente competitivos, aumentando a necessidade de pesquisa e desenvolvimento, visando a melhoria da eficiência, confiabilidade, manutenção e diagnóstico de falhas de componentes-chave, como por exemplo, os módulos fotovoltaicos. Um número significativo de estudos e trabalhos técnicos foi publicado até hoje, com base em vários trabalhos de investigações laboratoriais e estudo de falhas, especialmente para módulos fotovoltaicos de silício cristalino, que é a tecnologia fotovoltaica mais antiga e atualmente dominante, com aproximadamente 85-90% da participação no mercado fotovoltaico (Simbolotti et al. 2013).

É importante prevê as falhas prematuras dos módulos fotovoltaicos devido às degradações, segundo XiaoqingGu et al. (2018) graves problemas de qualidade dos módulos fotovoltaicos surgem gradualmente, colocando enormes desafios para esta nova indústria de geradores fotovoltaicos, as trilhas de caracol (*Snail trails*) é um deles. Em 2004, as trilhas de caracol foram encontradas pela primeira vez em módulos fotovoltaicos por XiaoqingGu et al. (2018), do Instituto de Pesquisa de Energia Solar Hamelin (ISFH). Veja a Figura 1.

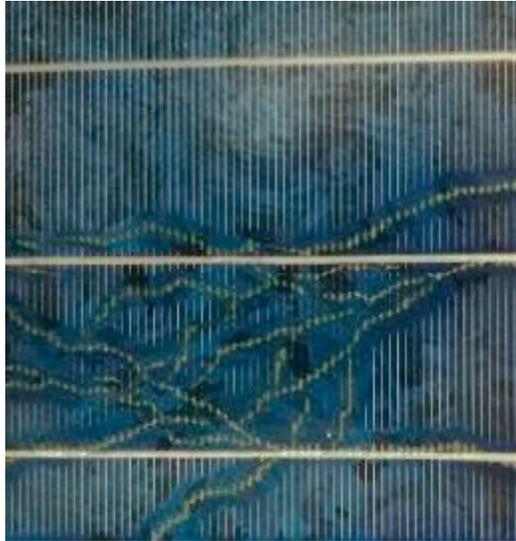


Figura 1 – Exemplo de Trilhas de Caracol (*Snail trail*)

Fonte: XiaoqingGu et al. (2018)

Este artigo representa um esforço para fornecer informações atualizadas contribuindo para o maior conhecimento das trilhas de caracol para a base de referência de publicações para pesquisadores, desenvolvedores, fabricantes e instaladores de sistemas fotovoltaicos.

2 | METODOLOGIA

Foi realizado um esforço para buscar as publicações mais recentes e relevantes, coletadas no portal de periódicos da CAPES/MEC e também no IEEE, sobre as trilhas de caracol. Na tentativa de tornar este banco de dados mais interessante e atual, conforme apresentado na Figura 2.

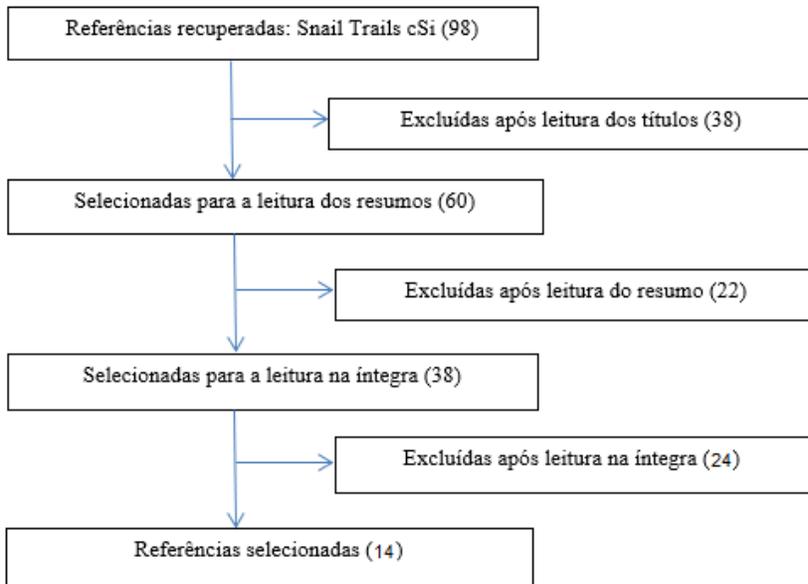


Figura 2 – Seleção das referências bibliográficas sobre o tema.

3 I DEGRADAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CAUSADAS POR SNAIL TRAIL

Degradação é a deterioração gradual das características de um componente ou de um sistema que pode afetar sua capacidade operacional dentro dos parâmetros aceitáveis e que é causada pelas condições de operação. Um módulo fotovoltaico degradado pode continuar fazendo sua função primária, de produção de energia elétrica a partir da irradiação solar, mesmo gerando abaixo do ideal. No entanto, o estado degradado do módulo fotovoltaico pode ser mais problemático quando a degradação excede um limite crítico, segundo Tamizhmani et al. (2013) o mercado atualmente trabalha considerando uma garantia de 20% de degradação máxima ao longo de 20 anos.

Quando os módulos fotovoltaicos são conectados ao sistema, eles são expostos ao ambiente externo e são influenciados por vários fatores ambientais, como contato e penetração da irradiação solar, umidade, penetração do ar, mudanças de temperatura, além de vibrações mecânicas provenientes do transporte, manejo e fixação. Quando os módulos fotovoltaicos são afetados pelos fatores listados acima, problemas de confiabilidade e durabilidade ocorrem. Existem grandes possibilidades de surgir trilhas de caracol. Afetando a operação de geradores fotovoltaicos, que depende, além de condições restritas de temperatura e umidade, da composição dos materiais com os quais são fabricados tanto a célula fotovoltaica, como seu encapsulamento e vidro.

3.1 Snail trail

Kim et al. (2013) mencionaram que o material de encapsulamento (EVA - Ethylene Vinyl Acetat ou acetato-vinilo de etileno) de módulos fotovoltaicos é um dos principais contribuintes para as snail trails. A mistura de Ag_2CO_3 e $\text{AgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, e que $\text{AgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ é a razão pela qual as trilhas de caracol são visíveis. Verificou-se também que a prata (Ag), que é utilizada nas grades metálicas na superfície das células fotovoltaicas, possui reações químicas com algumas substâncias da composição do EVA, surgindo assim o aparecimento de trilhas esbranquiçadas, ou seja, trilhas de caracol. Em um estudo realizado por Meyer et al. (2013) foi demonstrado que o vapor d'água que consegue penetrar pela parte de trás (*back sheet*) dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino, atinge a superfície das células e causa as trilhas de caracol. Quando o módulo é conectado à fonte de alimentação, exposto à luz ultravioleta e com a mudança de temperatura, pode ocorrer corrosão nas linhas de grade de prata e no EVA. Portanto, a luz ultravioleta, o vapor d'água e a temperatura são identificadas como gatilhos para o surgimento das trilhas de caracol.

Segundo Kim et al. (2013) as origens químicas e estruturais das trilhas de caracol, são devidos à formação do acetato de prata, bem como à sua reação com o encapsulante. O acetato de prata foi sintetizado por carbonato de prata originado da reação de íons de prata e dióxido de carbono e ácido acético que se originaram da degradação do encapsulante EVA.

Como informado por Meyer et al. (2013), do *Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics* CSP, as nanopartículas de prata acumuladas dentro da folha do encapsulamento causam a descoloração acastanhada, e que certos aditivos de folhas de encapsulamento e *back sheet* desencadeiam a formação dessas nanopartículas.

Uma vez que a descoloração ocorre com mais frequência nas bordas das células e nas microfissuras, Meyer et al. (2013) informam que a umidade é um papel fundamental na formação das trilhas de caracol. Em combinação com esta descoberta, de que as nanopartículas de prata podem ser facilmente induzidas unicamente pela incubação da folha de EVA em uma solução salina de prata, eles propuseram (Meyer et al., 2013) a seguinte hipótese para a formação de trilha: Sob condições operacionais, umidade ambiental pode entrar no módulo fotovoltaico através do *back sheet*; no entanto, a própria célula é uma barreira eficaz que protege o lado ensolarado da umidade. Somente as bordas das células ou microfissuras são locais onde o vapor d'água inserido pode se difundir na superfície da célula.

Na mesma linha de raciocínio os chineses Jing et al. (2017) relataram, através de experiências, que o acetato de prata é identificado como um componente essencial das trilhas de caracol. A reação química entre as linhas de grade de prata, ácido acético (liberado pelo encapsulante EVA) e oxigênio no topo de uma microfissura é fundamental para o surgimento das trilhas de caracol em módulos fotovoltaicos. A taxa de transmissão

de oxigênio do *back sheet* também tem influência significativa na formação deste fenômeno. Os resultados da simulação realizada, em 2017, por Jing et al. (2017) indicaram que a microfissura atua como um caminho para a difusão do gás, além do gap celular, o que explica por que as trilhas de caracol aparecem frequentemente acima de microfissuras ou próximo as bordas das células. Tanto a simulação quanto os testes de envelhecimento acelerado mostram que o encapsulante desempenha um papel importante na formação das trilhas de caracol.

Com uma visão diferente de outros pesquisadores, Hong et al. (2016) informaram que a fonte de prata metálica das trilhas de caracol não é dos barramentos de prata, mas das impurezas (fosfato de prata) dos aditivos do EVA. Impurezas de fosfato de prata em EVA foram adicionadas por acaso no processo de fabricação do encapsulante. No trabalho realizado por Hong et al. (2016) em módulos fotovoltaicos de silício cristalino com trilhas de caracol, foram investigadas características elétricas I-V e P-V, eletroluminescência (EL), análise termográfica em usinas fotovoltaicas. Os resultados obtidos mostraram que as trilhas de caracol podem afetar a produção de energia para módulos fotovoltaicos de silício cristalino, a produção de energia medida foi cerca de 9,1% menor do que a do módulo de referência.

Dolara et al. (2014), realizaram diversos testes visando detectar o impacto dos fenômenos das trilhas de caracol no desempenho de módulos fotovoltaicos e na produção de energia. Como pode ser verificado no fluxograma da Figura. 3. As medições experimentais ao ar livre foram realizadas em uma usina fotovoltaica no Politécnico de Milano, Itália.

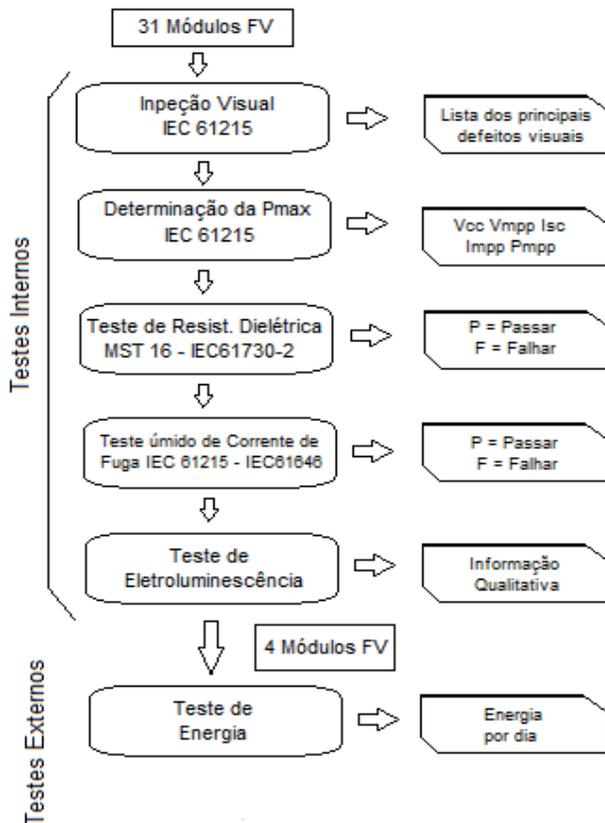


Figura 3 – Fluxograma de procedimento experimental

Fonte: Dolara et al. (2014) – Adaptada

Usando o ponto de potência máxima (mpp), a variação de potência (ΔP) em relação ao valor de potência nominal (P_n) foi calculada conforme mostrada na Equação (1):

$$\Delta P = \frac{P_{mmp} - P_n}{P_n} \times 100 \quad (1)$$

Um valor negativo da variação de potência (ΔP) significa uma redução na produção de energia em relação à energia nominal do *datasheet*, (considerando as Condições de Padrão de Testes) indicando possível problema no módulo.

Neste estudo, vários testes foram realizados para analisar alguns módulos afetados por trilhas de caracol. A determinação do *mmp* indicou uma redução de 10 a 30% em relação aos dados do *datasheet*. O teste indoor de eletroluminescência (EL), a Figura 4 demonstrou uma forte correlação entre a ocorrência das trilhas de caracol com microfissuras em células solares. Os resultados obtidos evidenciam que as microfissuras em células solares podem

reduzir a produção de energia de módulos fotovoltaicos em 29% em relação ao módulo de referência.

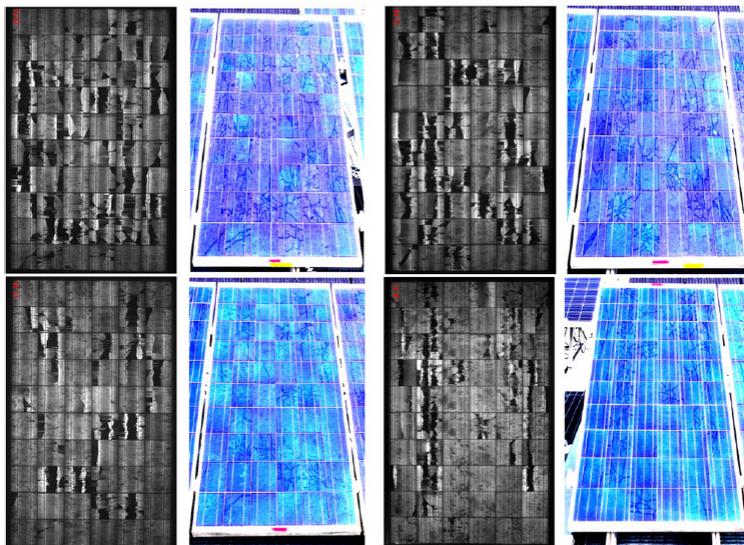


Figura 4 - Imagem de eletroluminescência e imagem dos módulos PV # 17, # 18, # 23 e # 24

Fonte: Dolara et al. (2016).

Os resultados obtidos dos testes de inspeção visual e determinação de máxima potência estão resumidos na Tabela 1 (Dolara et al., 2016). Os módulos fotovoltaicos (# 17, # 18, # 23 e # 24) foram escolhidos entre aqueles com o menor ΔP para serem analisados sob condições ambientais reais (Dolara et al. 2014).

#	P_N (W)	Finding—description	V_{OC} (V)	V_{MPP} (V)	I_{SC} (A)	I_{MPP} (A)	P_{MPP} (W)	EFF
17	220	Several Snail Trails. Fingers blackened. Evidence of burning on cells	36.81	28.21	8	5.73	161.6	-26.55%
18	220	Several Snail Trails. Fingers blackened. Evidence of burning on cells	36.8	28.46	7.63	5.66	161.2	-26.73%
23	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.68	28.54	8.03	5.96	170.1	-22.68%
24	220	Several Snail Trails. Evidence of burning on cells. Fingers blackened	36.14	27.67	8.21	6.21	171.8	-21.91%

Tabela 1 - Resultados obtidos pela inspeção visual e determinação máxima de potência

Fonte: Dolara et al. (2016)

Pesquisadores chineses (Zhou et al., 2015) verificaram a presença frequente de trilhas de caracol em células solares de módulos fotovoltaicos com microfissuras. Neste estudo, o papel dos encapsulantes, células e condições de laminação foram estudadas e discutidas experimentalmente. Um mecanismo integrado de formação de trilhas de caracol

foi proposto e parcialmente verificado por algumas provas experimentais que, a reação de migração e redução de íons de prata sob correntes seja a reação intrínseca desse fenômeno, enquanto a oxidação de nanopartículas de prata pelo peróxido de resíduo na grade de prata com microfissura foi a principal razão da descoloração sobre as células solares com trilhas de caracol (Zhou et al., 2015).

Embora o impacto de *back sheets* e encapsulantes na durabilidade do módulo fotovoltaico tenha sido estudado em grande escala, o papel das pastas de metalização é significativamente menos compreendido. Por meio de estudos detalhados, Meisel et al. (2015) conseguiram vincular a causa raiz das trilhas de caracol à química do EVA, que reage com a prata na presença de umidade introduzida em microfissuras. Eles investigaram a influência das microfissuras, bem como as propriedades dos materiais encapsulantes e *back sheets* nas taxas de ingresso de água e subsequente a formação do fenômeno. Como mostrado na Figura 5, uma camada de nanopartícula contendo prata escura é formada na região das trilhas de caracol na grade frontal, e o EVA naquela região é degradado. O ácido acético liberado durante o envelhecimento de EVA foi encontrado para catalisar a reação, acelerando assim a formação das trilhas de caracol (Figura 6).

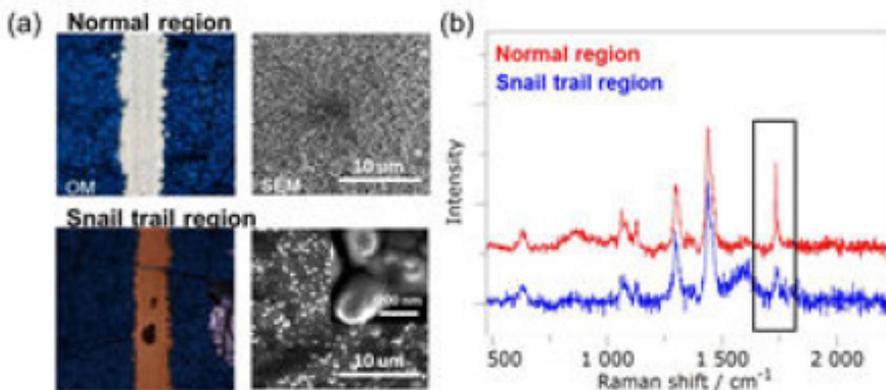


Figura 5 - (a) Imagens de microscopia em células solares não afetadas e afetadas por trilhas de caracol, respectivamente. (b) dados de EVA na região da trilha normal e com *snail trail*

Fonte: Meisel et al., 2015

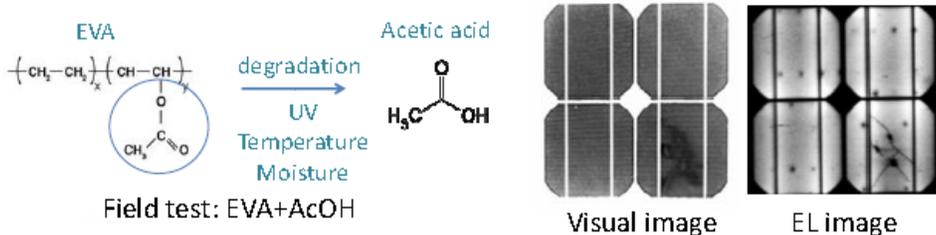


Figura 6 - Formação de ácido acético devido à degradação de EVA causada por radiação UV, temperatura e umidade (topo) e formação de snail trails para EVA que foi misturado com 0,1% de ácido acético

Fonte: Meisel et al., 2015.

Após o teste UV30 + DH200 de 200 horas, XiaoqingGu et al. (2018) informaram que um dos fatores importantes para as trilhas de caracol é a composição do EVA. *Back sheet* não é o principal contribuinte para as trilhas de caracol. Elas sempre aparecerão com ou sem *back sheet* (XiaoqingGu et al., 2018). Microfissuras, também são um fator chave. Elas evitam que a umidade evapore do módulo, fazendo com que a umidade penetre no módulo fotovoltaico, facilitando da formação das trilhas de caracol.

Existe uma controvérsia ao impacto das trilhas de caracol no desempenho do módulo fotovoltaico, alguns pesquisadores acreditam que as trilhas de caracol têm um pequeno impacto no desempenho dos módulos fotovoltaicos, Yang et al. (2018) investigaram em detalhes por seis anos, através de testes de confiabilidade, que o impacto no desempenho de módulos fotovoltaicos com trilhas de caracol é modesto, pois as trilhas de caracol afeta apenas a transmissão da irradiação solar. Os resultados dos testes mostraram que a degradação média de energia dos módulos com trilhas de caracol foi de 5,90%, enquanto a degradação média de energia dos módulos sem trilhas de caracol foi de 5,64% (diferença de apenas 0,26%) durante um período de operação de seis anos.

Para avaliar o impacto das trilhas de caracol na confiabilidade de longo prazo dos módulos fotovoltaicos, eles aplicaram testes de confiabilidade estendida baseados no padrão internacional IEC 61215 (Yang et al., 2018). Os testes de confiabilidade estendida de módulos fotovoltaicos com trilhas de caracol revelam que a degradação média de energia foi de 1,77% e 0,68% após o teste de calor húmido ao longo de 1250 h e o ciclo térmico teste de 500 ciclos, respectivamente. Estes resultados sugerem que a confiabilidade a longo prazo e a durabilidade dos módulos fotovoltaicos não são afetados pelas trilhas de caracol. Provando assim que a grade de Ag abaixo das trilhas de caracol não tem alteração, e nenhuma corrosão pode ser identificada.

Apesar de Yang et al. (2018) de afirmarem nas suas pesquisas que, as trilhas de caracol não afetam o desempenho de módulos fotovoltaicos, muitos pesquisadores afirmam o contrário, como exemplo temos as simulações em laboratório e ao ar livre realizadas por

Liu et al. (2015) mostraram que módulos fotovoltaicos com trilhas de caracol apresentaram degradação de energia em 2% após os testes de envelhecimento TC200 (200 ciclos térmicos), HF10 (10 dias de umidade) e DH (1000 horas de calor úmido) de acordo com os padrões IEC 61215 - 10.11, 10.12 e 10.13, respectivamente. As principais perdas de energia acima de 5% vieram de microfissuras em células solares antes da formação de trilhas de caracol. Isso significava que a maioria das perdas de energia dependia de microfissuras antes do surgimento das trilhas de caracol (Liu et al., 2015).

Em uma parceria entre o Centro Nacional de Pesquisa e Educação Fotovoltaica (NCPRE) do Instituto Indiano de Tecnologia de Bombaim (IITB) e o Instituto Nacional de Energia Solar (NISE), foi realizada uma pesquisa em 2016 para avaliar a confiabilidade e a durabilidade de módulos fotovoltaicos em diferentes partes da Índia. Um total de 925 módulos foram inspecionados em 37 locais em todas as 6 zonas climáticas da Índia (Chattopadhyay et al., 2016)

Conforme relata Chattopadhyay et al. (2016) microfissuras nas células fotovoltaicas podem levar a efeitos diferentes no encapsulante. Nos módulos fotovoltaicos antigos (antes de 2011) com descoloração, microfissuras nas células solares é possível a penetração de oxigênio através do encapsulante descolorindo no topo das células solares, e esse oxigênio então apresenta descoloração na presença da irradiação solar. Por outro lado, em vários módulos mais novos (após 2011), a umidade e outros gases são capazes de migrar através das microfissuras nas células e causar a formação de trilhas de caracol no topo das células (Chattopadhyay et al., 2016). Além disso, o espaçamento entre as células pode servir como um caminho para a penetração de umidade até a grade metálica no topo das células solares, e em alguns casos isso leva ao aparecimento de trilhas de caracol nas bordas destas células. Nesta pesquisa, foi encontrada uma boa correlação entre as trilhas de caracol e microfissuras em células solares.

Mediante Chattopadhyay et al. (2016) a descoloração da metalização é observada em todas as zonas climáticas, mas sua severidade é mais alta na zona quente e úmida. Pequenas / médias instalações têm uma severidade média maior em comparação com grandes instalações, o que implica uma diferença na qualidade do material usado nessas instalações. Outros problemas que também propiciam o surgimento de trilhas de caracol são os arranhões no *backsheet*, no vidro frontal e estrutura, pois possibilita a penetração de umidade nos módulos fotovoltaicos. Portanto é necessária uma preocupação constante no transporte, no manuseio dos módulos e também a utilização de materiais de qualidade que suportem ambientes externos e possam fornecer os níveis necessários de segurança durante toda a vida útil da instalação.

Os pesquisadores indianos após as conclusões finais da pesquisa realizada em 2016 na Índia (Chattopadhyay et al., 2016) recomendaram que os materiais usados em módulos fotovoltaicos como o EVA e o *backsheet*, devem ser de boa qualidade e especificados pelo fabricante no *datasheet* e também no edital de aquisição. Também recomendam a realização

de ensaios de eletroluminescência (EL) em campo após o recebimento dos módulos fotovoltaicos no local da instalação e após a instalação para verificar se houve o surgimento de microfissuras durante as fases de transporte, manejo e instalação. Chattopadhyay et al. (2016) também alerta sobre a necessidade de realização de estudos sobre os fenômenos de degradação em climas quentes pela comunidade fotovoltaica, devido apresentar um ambiente operacional agressivo para os módulos fotovoltaicos.

4 | CONCLUSÃO

Como foco principal das pesquisas listadas acima, é possível concluir que o surgimento das trilhas de caracol em módulos fotovoltaicos de silício cristalino está diretamente ligado à penetração do vapor d'água, juntamente com a temperatura de operação elevada, bem como à reação do encapsulante com as grades e barramentos de prata (Ag), que desencadeiam a formação de nanopartículas, causadoras da descoloração acastanhada (as trilhas de caracol) encontradas em vários módulos fotovoltaicos.

Também é relatado que a microfissura atua como um caminho para a difusão do gás, além do gap celular, o que explica por que as trilhas de caracol normalmente aparecem acima de célula solar com microfissuras ou próximo da borda da célula.

Foi possível verificar que alguns pesquisadores defendem que as trilhas de caracol não diminuem diretamente a produção de energia elétrica, mas a maioria dos artigos encontrados atualmente defendem que as trilhas de caracol comprometem sim o desempenho dos módulos principalmente quando estão atreladas com microfissuras. E também vários autores dizem que as microfissuras nas células são uma condição prévia para o surgimento de trilhas de caracol em células solares.

As normas de certificação (por exemplo, 61215), que estão sendo utilizadas atualmente, precisam levar em conta os fenômenos climáticos e desenvolver procedimentos de teste de aceleração do envelhecimento que atinjam temperaturas mais altas.

A investigação de defeitos em módulos fotovoltaicos de silício cristalino é muito importante para a indústria fotovoltaica. Então existe a necessidade eminente de continuar os estudos sobre as trilhas de caracol até mesmo para que, em um futuro próximo chegarmos a um consenso sobre a real causa desta degradação.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem aos colaboradores do Laboratório GREEN (Grupo de Estudos em Energia) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelo apoio de troca de experiências. O GREEN é um laboratório referência no cenário nacional nos estudos e pesquisas em energias renováveis, e possui recursos laboratoriais que possibilitam condições ideais para o desenvolvimento de diversos trabalhos sobre sistemas

fotovoltaicos. O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CEFET-MG, que possui um programa institucional de apoio à Pós-Graduação dos servidores, concedendo uma licença para capacitação e inclusive custeando parte a mesma.

REFERÊNCIAS

Chattopadhyay, S., Dubey, R., Kuthanazhi, V., Zachariah, S., Bhaduri, S., Mahapatra, C., Rambabu, S., Ansari, F., Chindarkar, A., Sinha, A., Singh, H. K., Narendra Shiradkar, Arora, B. M., Kottantharayil, A., Narasimhan, K. L., Sabnis, S., Vasi, J. Birinchi Bora, B., Kumar, G., Bangar, M., Kumar, M., Haldkar, A. K., Singh, R., Raghava, S., Morampudi, M., Ganesh, G., Kumar, R., Sastry, O. S. 2016. **All-India Survey of Photovoltaic Module Reliability: 2016**. National Centre for Photovoltaic Research and Education Indian Institute of Technology, National Institute of Solar Energy Gwalpahari, India.

Dolara, A., Leva, S., Manzolini, G., Ogliari, E., 2014. **Investigation on Performance Decay on Photovoltaic Modules: Snail Trails and Cell Microcracks**, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, N°. 5. http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html.

Dolara, A., Lazaroiu, G.C., Leva, S., Manzolini, G., Votta, L., 2016. **Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production**, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 6, N°. 5, http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html.

Hong, Y., Jipeng, C., He, W., Dengyuan, S., 2016. **Power degradation caused by snail trails in urban photovoltaic energy systems**, Energy Procedia, Vol. 88, pp. 422 – 428. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2016.06.018>

Jing F., Daliang, J., Xiaoqin, Y., Zhen, P., Mason, T., William, G., Katherine, S., Junhui, L., Wusong T., Zengsheng, L., Yafeng, L., Mao, W., Qiuju, W., Torence, J.T., 2017. **Study on snail trail formation in PV module through modeling and acceleratadaging test**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.164, pp.80-86. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2017.02.013>

Kim, N., Hwang, K., Kim, D., Lee, J., Shinyoung Jeong, S., Jeong, S. H., 2013. **Analysis and reproduction of snail trails on silver grid lines in crystalline silicon photovoltaic modules**, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 124, pp. 153-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.11.040>.

Liu, H., Huang, C., Lee, W., Yan, S., Lin, F., 2015. **A Defect Formation as Snail Trails in Photovoltaic Modules**, Energy and Power Engineering, Vol. 7, pp. 348-353. <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2015.78032>

Meisel, A., Xu, Y., Fan, J., Wang, J., Dang, T., Alcantara, C., Inns, D., Terry, M., Kapur, J., Hamzavytehrany, B., Gambogi, W., Antoniadis, R., 2015. **Holistic View of Interactions in Modules Affecting Durability – Adhesion and Snail Trails**, IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, USA. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355705>

Meyer, S., Timmel, S., Richter, S., Werner, M., Gläser, M., Swatek, S., Braun, U., Hagendorf, C., 2013. **Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules**, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 121, pp. 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.013>

Simbolotti, G., Taylor, M., Tosato, G., Kempener, R., 2013. **Photovoltaic solar power insights for policy makers**. IEA – Energy Technology Network and IRENA – International Renewable Energy Agency. https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E11IR_PV_GSMT_Jan2013_final_GSOK.pdf

Tamizhmani, G.; Kuitche, J., 2013. **Accelerated lifetime testing of photovoltaic modules. Solar America Board for Codes and Standard.** <http://www.solarabcs.org/about/publications/reports/acceleratedtesting/pdfs/SolarAB-Cs-33-2013.pdf>

XiaoqingGu, X., Liu, Z., Qiu, Y., Cao, C., Lim, M. T., 2018. **Na Effective Method on Evaluating Photovoltaic Module Snail Trail**, 12th SNEC, Energy Procedia, Vol. 150, pp. 58-65. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.09.007>

Yang, H., He, W., Wang, H., Huang, J., Zhang, J., 2018. **Assessing power degradation and reliability of crystalline silicon solar modules with snail trails**, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 187, pp. 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.021>

Zhoua,G., Xionga, X., Zhoub, W., Liu, Y., Sanga, V., Koua, Z., 2015. **Mechanism analysis of snail trails in photovoltaic modules.** First PV Material CO., IEEE, China.

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