

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

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

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
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: desenvolvimento e inovação tecnológica 2

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Flávia Roberta Barão
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica 2 / 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 978-65-5983-133-3

DOI 10.22533/at.ed.333211706

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

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

SINCRONIZAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA HIDRÁULICA A PARTIR DA TÉCNICA DE PLL COM ACOPLAMENTO ÓTICO

Joelson Lopes da Paixão
Mauro Fonseca Rodrigues
José Oizimas Junior

DOI 10.22533/at.ed.3332117061

CAPÍTULO 2..... 15

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE NEWTON-RAPHSON E DE SOMA DE CORRENTES PARA SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Hugo Andrés Ruiz Flórez
Cristiane Lionço Zeferino
Leandro Antonio Pasa
Gloria Patricia Lopez Sepulveda
Eduarda Abatti Dahlem

DOI 10.22533/at.ed.3332117062

CAPÍTULO 3..... 29

AUTOMATED LOAD-BALANCING PROCESS ANALYSIS IN LOW-VOLTAGE GRID USING PETRI NETS

José Ruben Sicchar Vilchez
José Reinaldo Silva
Carlos Tavares da Costa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117063

CAPÍTULO 4..... 41

ANÁLISE ESTÁTICA E DINÂMICA DA INFLUÊNCIA DO GENERALIZED UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Ednei Luiz Miotto
Bruno Rafael Gamino
Elenilson de Vargas Fortes
Percival Bueno de Araujo
Luís Fabiano Barone Martins

DOI 10.22533/at.ed.3332117064

CAPÍTULO 5..... 55

SOLUÇÕES INOVADORAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MINIGERAÇÃO NA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM

André Ross Borniatti
Pedro Daniel Bach Montani
Luís Eduardo Rocha Nepomuceno
Daniel Pinheiro Bernardon
Luciane Neves Canha
Lucas Thadeu Orihuela da Luz

Giuliano Bolognesi Archilli
Isabel Fighera Hartmann
Marcia Henke
Táisson Soares Graebner
Tiago Bandeira Marchesan

DOI 10.22533/at.ed.3332117065

CAPÍTULO 6..... 69

LABORATÓRIO SMART GRID: AMBIENTE CIBER-FÍSICO PARA TESTES SISTÊMICOS DE FUNCIONALIDADES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Luiz Henrique Leite Rosa
Marcio Ribeiro Cruz
Carlos Frederico Meschini Almeida
Nelson Kagan
Alexandre Dominice

DOI 10.22533/at.ed.3332117066

CAPÍTULO 7..... 82

GESTÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO CAMPUS SALVADOR: IMPLEMENTANDO AÇÕES PARA REDUZIR O CONSUMO COM A CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA

Carollina Silva de Santana
Armando Hirohumi Tanimoto

DOI 10.22533/at.ed.3332117067

CAPÍTULO 8..... 91

TRANSIENT ANALYSIS OF CLASSICAL AND MODIFIED LUMPED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL IN POWER SYSTEMS

Jaimis Sajid León Colqui
Sérgio Kurokawa
Anderson Ricardo Justo de Araújo
José Pissolato Filho

DOI 10.22533/at.ed.3332117068

CAPÍTULO 9..... 109

ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO ADAPTATIVO APLICADO NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM WAMS

Lucas Luiz Lunarti
Maury Meirelles Gouvêa Júnior

DOI 10.22533/at.ed.3332117069

CAPÍTULO 10..... 117

DESENVOLVIMENTO DE MODELO E PROTÓTIPO PARA OTIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS

Vinicius Pedroza Delsin
Antonio Newton Licciardi Junior

DOI 10.22533/at.ed.33321170610

CAPÍTULO 11	132
SÍNTESE DE UM CONTROLADOR MPC PARA O CONDICIONAMENTO DE AR DO EDIFÍCIO MODERNO	
Míriam Tvrzská de Gouvêa	
Catarina Gomes dos Santos	
Alessandro Ferreira da Silva	
José Pucci Caly	
Maria Thereza de Moraes Gomes Rosa	
DOI 10.22533/at.ed.33321170611	
CAPÍTULO 12	145
SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO INDOOR BASEADO EM MODELO DE HAMMERSTEIN UTILIZANDO TRILATERAÇÃO	
Almir Souza e Silva Neto	
Paulo Henrique Gonçalves Melo	
Fernando Antônio Tocantins Nunes	
DOI 10.22533/at.ed.33321170612	
CAPÍTULO 13	159
ESTUDO EXPERIMENTAL DA ARGILA KIMBERLITO DO BRASIL NA APLICAÇÃO DE ANTENAS RESSOADORAS DIELÉTRICAS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS	
Diêgo da Mota Colares	
Roterdan Fernandes Abreu	
João Paulo Costa do Nascimento	
Juscelino Chaves Sales	
Antonio Sergio Bezerra Sombra	
DOI 10.22533/at.ed.33321170613	
CAPÍTULO 14	167
LEVANTAMENTO DE NÃO CONFORMIDADES TÉRMICAS (NCT) ATRAVÉS DE ANÁLISES TERMOGRÁFICAS NA SUBESTAÇÃO FORTALEZA II DA COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO	
Fagner Leite Sales	
DOI 10.22533/at.ed.33321170614	
CAPÍTULO 15	173
EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE TUCUMÃ POR SOLVENTE UTILIZANDO ETANOL E METANOL	
Yanael Lima de Medeiros	
Mariana Silva Dorta de Melo	
Amanda Santana Peiter	
DOI 10.22533/at.ed.33321170615	
SOBRE OS ORGANIZADORES	179
ÍNDICE REMISSIVO	180

DESENVOLVIMENTO DE MODELO E PROTÓTIPO PARA OTIMIZAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS

Data de aceite: 01/06/2021

Vinicius Pedroza Delsin

<http://lattes.cnpq.br/6827641444982722>

Antonio Newton Licciardi Junior

<http://lattes.cnpq.br/2276618624922896>

<https://orcid.org/0000-0002-6755-883X>

RESUMO: A globalização e os avanços nas áreas de tecnologia e ciência naturalmente geram um aumento no consumo de energia elétrica. O consumo de energia tem estado constantemente na pauta de sustentabilidade da ONU. Diante disso, a utilização de energias renováveis e de baixo impacto ambiental deixou de ser uma opção e passou a ser uma necessidade. O Brasil é um país que possui ótima localização geográfica do ponto de vista de insolação. As placas fotovoltaicas veem suprindo esse crescente aumento na demanda por energia solar sustentável, porém a eficiência de conversão energética delas ainda é um ponto de atenção, que instiga pesquisas e estudos. Esse trabalho tem como objetivo detalhar e comprovar as principais técnicas e maneiras utilizadas para melhorar a eficiência energética de placas solares. Particularmente é dado foco a geração fotovoltaica assistida por um seguidor (*tracker*). E, também, com acoplamento de sistema de arrefecimento e ainda refletores para aumentar a luminosidade sobre os painéis. Além disso, visa evidenciar eventuais vantagens e desvantagens de um protótipo, utilizando algumas técnicas de otimização energética em conjunto, com intenção

de obter uma melhor relação entre custo e geração de energia de um sistema fotovoltaico. Conseqüentemente, verificar a melhoria do tempo de retorno de investimento e apontar as complementações necessárias.

PALAVRAS-CHAVE: Placa Fotovoltaica. Eficiência Energética. Otimização.

ABSTRACT: Globalization and advances in technology and science naturally generate an increase in electricity consumption. Energy consumption has been constantly on the ONU scheduler for sustainability. Therefore, the use of renewable energies with low environmental impact is no longer an option and has become a necessity. Brazil is a country that has an excellent geographical location for solar cells. Photovoltaic plates are supplying this growing increase in the demand for sustainable solar energy, but their energy conversion efficiency is still a point of attention, which instigates research and studies. This work aims to find and prove the main techniques and ways used to improve the energy efficiency of solar panels. Particular focus is given to photovoltaic generation assisted by a follower (*tracker*). And, also, with cooling system coupling and reflectors to increase the luminosity on the panels. In addition, it aims to show the advantages and disadvantages of a prototype, using some optimization techniques together, with the intention of obtaining a better relationship between the cost and the energy generation of a photovoltaic system. Consequently, verify an improvement in the return on investment time and point out as necessary complementations.

KEYWORDS: Photovoltaic Panels. Energy

INTRODUÇÃO

A atual matriz elétrica brasileira é composta principalmente por usinas hidroelétricas e térmicas, segundo o ministério de minas e energia, 64% da energia elétrica produzida no Brasil vem de usinas hidrelétricas (GOVB, 2020). Apesar de serem consideradas limpas e renováveis, as usinas hidrelétricas causam um grande impacto social e ambiental na região, devido a realocação de populações ribeirinhas, alagamento de grandes áreas e processo de degradação anaeróbica das áreas alagadas gerando gases do efeito estufa. Além disso, grande parte dos rios de alta capacidade de geração já vem sendo utilizados no Brasil (ARAÚJO et al. 2016, p20).

As placas fotovoltaicas são uma solução para geração de energia limpa e renovável (FIEP,2018), as placas possuem flexibilidade de instalação, mínima necessidade de manutenção e uma boa relação energia gerado por metro quadrado, esses são alguns dos fatores que vem acarretando nesse crescente aumento da geração de energia solar nos últimos anos (KRUANGAM et al. 2006).

O Brasil tem destaque para instalação de placas solares devido ao seu posicionamento estratégico, o projeto de sistemas fotovoltaicos normalmente exigem uma radiação de no mínimo 3 ou 4 kWh/(m² .dia) (PINHO, 2014). Na Figura 1 é possível observar o potencial disponível para o Brasil comparado com países da Europa, vários dos quais já utilizam largamente a geração de energia elétrica por placa solar como a Alemanha e a Espanha (PINHO, 2014).

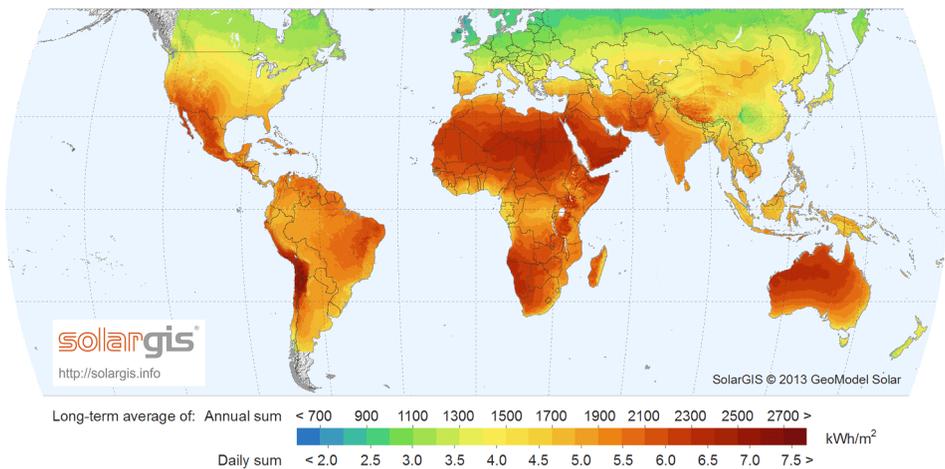


Figura 1 - Mapa de irradiação no mundo

Fonte: (Solargis, 2013).

Segundo a Empresa de pesquisa Energética as placas fotovoltaicas já representavam em 2018 uma fatia de 65% da geração de energia distribuída pelo Brasil. Entretanto, mesmo com o crescente aumento na geração de energia solar, a porcentagem referente a geração de energia estava em 0,5% do total de energia gerada no Brasil (ENERGÉTICA, 2019), demonstrando assim o grande potencial de crescimento desse setor.

As principais dificuldades enfrentadas para uma expansão na utilização de sistemas fotovoltaicos em residências, indústrias e comércios são o alto investimento inicial na aquisição e instalação das placas solares e o tempo de retorno de investimento (ROI) das placas. No Brasil, o tempo de ROI pode variar bastante, devido aos diferentes climas presentes nas regiões e dos valores cobrados em cada local, por isso, é importante que cada caso seja estudado individualmente, entretanto, segundo uma projeção realizada pela ANEEL em 2017, o tempo de retorno médio no país é de 6,6 anos.

Um dos fatores que aumentam esse tempo de retorno do investimento é a eficiência de conversão das células solares, essa medida é dada pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as células comerciais apresentam um índice de eficiência entre 15% e 19% (DOS PASSOS, 2017, p23).

Com o propósito de melhorar a eficácia deste processo de geração, várias técnicas de otimização foram desenvolvidas, algumas simples como a instalação da placa com as inclinações corretas para otimizar a incidência solar diária, outras mais elaboradas como seguidores solares, técnicas de arrefecimento e uso de refletores.

REFERENCIAL TEÓRICO

Eficiência energética é a medida da proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica, segundo a ANEEL a eficiência energética de uma placa fotovoltaica convencional gira em torno de 14% a 25%.

O INMETRO (Instituto Nacional de Meteorologia Qualidade e Tecnologia) estabelece os requisitos e ensaios pelos quais os módulos fotovoltaicos devem ser submetidos para receber a homologação e o respectivo selo de conformidade que pode ser observado na Figura 2, permitindo assim a utilizaçãoem do módulo em sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica (SILVA et al. 2014).

Após a realização dos ensaios em laboratório, é realizada uma classificação de “A” até “E”, sendo “A” a melhor categoria para eficiência energética e “E” a pior (PINHO et al. 2014).

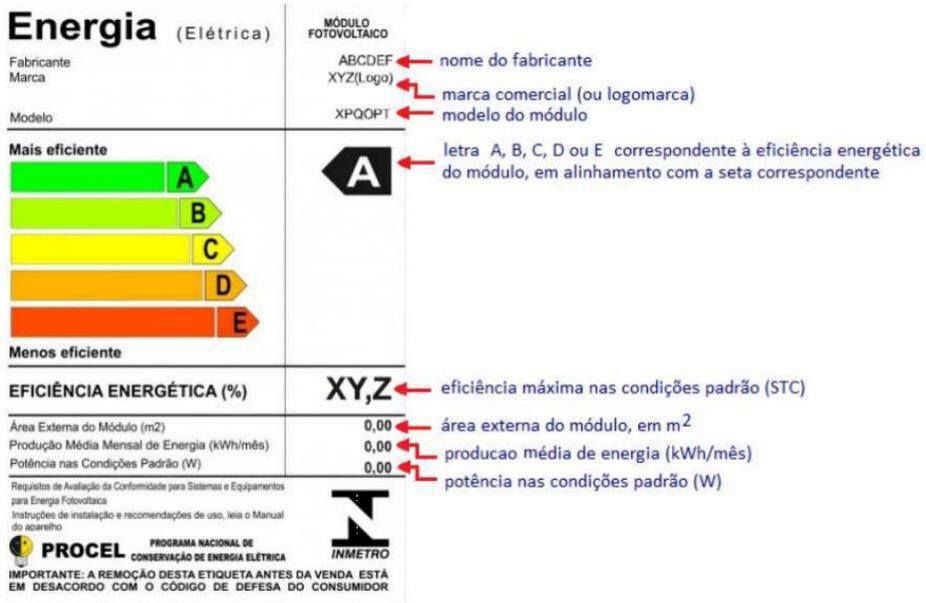


Figura 2 contém um exemplo da etiqueta padrão utilizada.

Fonte: (SILVA, 2014)

O *Tracker* ou seguidor solar é um equipamento que é acoplado ao suporte da placa fotovoltaica, permitindo que ela rotacione em volta do próprio eixo, a rotação pode ter um ou dois eixos de liberdade (DA SILVA LEMOS, 2020).

Essa liberdade de rotação permite que a placa acompanhe a direção com maior irradiação solar, assim aumentando seu tempo de exposição e gerando mais energia (BLASZCZAK, 2017). Em teste realizados pelo o pelo Departamento de Mecânica e Engenharia da Universidade de Bhubaneswar na Índia, um *tracker* com um eixo de liberdade demonstrou um desempenho superior em todos os horários e em todas as condições climáticas, produzindo em média um aumento de 22% na eficiência dos painéis fotovoltaicos fixos, tendo uma melhora mais significativa em dias nublados e em horários com menos intensidade de raios luminosos (JENA et al. 2015). Na Figura 3 é possível observar um esquema de um *tracker* com um grau de liberdade.

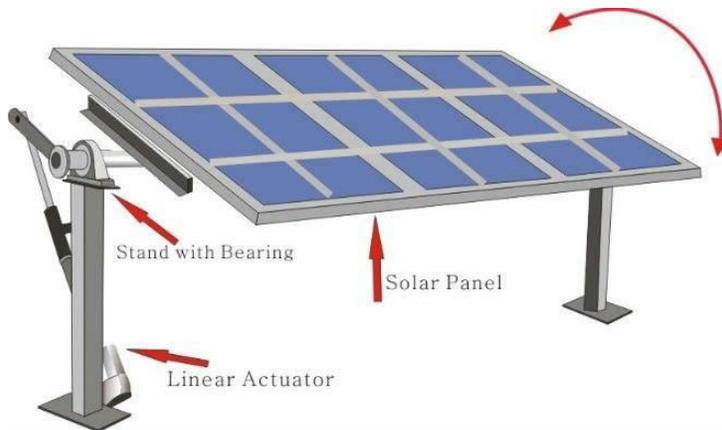


Figura 3 - Exemplo de *Tracker* com 1 eixo de rotação.

Fonte: (DA SILVA LEMOS, 2020)

Em um estudo realizado pela Universidade de São Paulo escola de engenharia de São Carlos, demonstrou que um seguidor solar, com dois eixos de rotação apresenta um aumento de 18% de eficiência em relação ao um seguidor de apenas um eixo de rotação e um aumento de 39% em relação a uma placa fixa. Esse mesmo estudo também apresenta um aumento de 25% de eficiência entre uma placa com um seguidor solar com dois eixos de liberdade e uma placa fixa posicionada de forma otimizada em relação a sua localização geográfica (TREVELIN, 2014).

O equipamento seja de 1 ou 2 eixos de liberdade pode ter seu movimento pré-estabelecido, assim fazendo todos os dias as mesmas posições nos mesmos horários, ou ele pode funcionar de maneira inteligente, valendo-se do uso de sensores e microcontroladores de baixo custo e alto desempenho, para assim decidir a melhor posição para cada momento do dia (CORTEZ et al. 2013).

O arrefecimento da placa fotovoltaica é possivelmente o mais eficiente e menos explorado das técnicas de otimização conhecidas, o aumento da temperatura do painel solar compromete sua capacidade de gerar energia (JURANIC, 2020).

A potência do gerador Fotovoltaico cai entre 0,3 e 0,4% a cada aumento de 1°C. Os painéis fotovoltaicos normalmente não operam em locais com condições ideais para seu funcionamento, no caso da temperatura os ensaios laboratoriais são realizados a 25 graus Celsius, tendo na maioria das aplicações a temperatura do painel muito superior, acarretando assim em uma perda na sua potência (ALMEIDA, 2012).

Segundo Vinícius Oliveira da Silva, mestrando em sistemas de potência pela USP, que desenvolveu um Protótipo de equipamento resfriador de painéis fotovoltaicos, após a temperatura de um painel solar atingir 45 graus Celsius, há uma perda de 0,5% da eficiência na geração de energia a cada grau de aumento (DA SILVA, 2016).

De acordo com uma pesquisa realizada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, por Gustavo Marques Mattos, o aumento da temperatura na placa diminui os seus valores de tensão e conseqüentemente, sua potência. Já a corrente elétrica não apresenta variação relevante com o aumento da temperatura. Portanto, o que faz a potência da placa fotovoltaica diminuir com o aumento da temperatura é exclusivamente a queda em seus valores de tensão (MATTOS, 2016).

Até o momento, a principal forma de se reduzir a temperatura de uma placa fotovoltaica foi a instalação da placa sobre a água, local em que a temperatura tende a ser mais baixa que no solo (NASCIMENTO, 2020). A Figura 4 contém uma fotografia de instalação de painéis solares sobre a água, com o objetivo de arrefecimento.



Figura 4 - Exemplo de instalação de placas fotovoltaicas sobre a água.

Fonte: (DOS REIS, 2020).

Em virtude da tentativa de aumentar o aproveitamento da radiação solar, alguns sistemas fotovoltaicos recorrem refletores para redirecionar raios que não seriam capturados pelas placas, possibilitando assim uma maior quantidade de irradiação diária. O desenvolvimento de um sistema mecânico que acopla espelhos junto as placas fotovoltaicas pode gerar um aumento de 7% na sua eficiência (CORNELIUS, 2017). A Figura 5 contém fotografia e dados de eficiência de placa solar usada com e sem espelho.

Tabela 1 - Características de teste		
Painel Solar	Sem espelho	Com espelho
V_{oc} (V)	29,1	29,4
I_{sc} (A)	2,63	3,4

Tabela 2 - Resultados com carga		
Painel Solar	Sem espelho	Com espelho
Tensão (V)	12	12
Corrente (A)	1,71	1,84
Potência (W)	20,52	22,08
Eficiência (%)	7,57	8,15



Figura 5 - Comparação entre placa fixa e placa com acoplamento de espelho.

Fonte: (CORNELIUS, 2017).

METODOLOGIA

Com o objetivo de se detalhar e confirmar os dados obtidos no referencial teórico, foram realizados ensaios de campo com algumas das técnicas e equipamentos citados. Na realização dos ensaios foram auferidas medições simultâneas em duas placas fotovoltaicas de mesmo fabricante e características. Os dados técnicos das placas podem ser examinados na fotografia do selo INMETRO da Figura 6 e os dados da Tabela 2.

Komaes Solar

Model No.: KM(P) 10
 Peak Power (Pmax): 10W
 Maximum Power Current (Imp): 0.60A
 Maximum Power Voltage (Vmp): 17.56V
 Short-Circuit Current (Isc): 0.66A
 Open-Circuit Voltage (Voc): 21.52V
 Power Tolerance: ± 5 %
 Application Class: DC 12V
 Weight: 1.04kg
 Dimension (mm): 370x250x18mm
 Maximum System Voltage: 750 V

All technical data at standard test condition
 AM=1.5 E=1000W/m² Tc=25°C

WARNING ELECTRICAL HAZARD
 THIS UNIT PRODUCES DC ELECTRICITY WHEN EXPOSED TO LIGHT. COVER GLASS BEFORE REMOVING TERMINAL JUNCTION BOX LID.

NINGBO KOMAES SOLAR TECHNOLOGY CO.,LTD
 www.komaes-solar.com

Energia (Elétrica)

Fabricante: S3 SOLAR KOMAES
 Modelo: KM(P)10

Mais eficiente: A, B, C, D
 Menos eficiente: E

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (%) **10,8**

Área Externa do Módulo (m²): 0,09
 Produção Média Mensal de Energia (kWh/mês): 1,23
 Potência nas Condições Padrão (W): 10,08

PROCEL

Figura 6 - Dados de Referência da Placa Solar

Fonte: os autores

Característica	Valor
Potência Máxima (Pmax)	10 W
Tensão Máxima Potência (Vmp)	17,56 V
Tensão Circuito Aberto (Voc)	21,52 V
Corrente Máxima Potência (Imp)	0,60 A
Corrente de Curto Circuito (Isc)	0,66 A
Temperatura Referência (T0)	25 °C
Medidas	370x250x18mm
Peso	1040 g

Tabela 2 – Dados Relevantes da Placa Solar

Fonte: os autores

Para a confirmação de eficiência do acoplamento de espelhos nas placas solares, foram instaladas duas placas paralelas ao solo, em uma das placas foi colocado um espelho de 350mm x 250mm perpendicularmente ao solo. Foram realizadas medições simultâneas dos valores de tensão e corrente de ambas as placas das 10 horas até as 17 horas e 30 minutos durante vários dias. O ensaio foi realizado em dias ensolarados na cidade de Santos. Os valores de tensão e corrente médios coletados nas medições são apresentados na Tabela 3.

Horário	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Sem Refletor	18,24V 0,17A	19,37V 0,18A	19,34V 0,18A	19,61V 0,18A	19,45V 0,18A	18,94V 0,17A	18,12V 0,16A	17,23V 0,16A
Com Refletor	18,39V 0,18A	19,36V 0,19A	19,39V 0,19A	19,73V 0,19A	19,59V 0,19A	18,93V 0,18A	18,25V 0,17A	17,26V 0,17A
Horário	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Sem Refletor	16,43V 0,14A	14,34V 0,13A	10,78V 0,09A	8,89V 0,08A	7,21V 0,06A	3,92V 0,02A	3,12V 0,02A	1,57V 0,01A
Com Refletor	16,47V 0,15A	14,46V 0,14A	10,83V 0,10A	9,97V 0,08A	7,23V 0,07A	3,87V 0,03A	3,40V 0,02A	1,75V 0,01A

Tabela 3 - Dados de Tensão e Corrente coletados

Fonte: os autores

Para a confirmação de eficiência do arrefecimento das placas solares, foi instalado duas placas paralelas ao solo, uma das placas foi instalada sobre uma superfície de água disponível em um recipiente de pequena espessura, aproximadamente 15 cm, e de tamanho próximo ao da placa utilizada. Foram realizadas medições simultâneas dos valores de tensão e corrente de ambas as placas das 10 horas até as 17 horas e 30 minutos, o ensaio foi realizado durante alguns dias ensolarados na cidade de Santos. Os valores de tensão e

corrente médios coletados nas medições são apresentados na Tabela 4.

Horário	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
Solo	17,73V 0,16 ^a	17,56V 0,16A	18,87V 0,17A	19,23V 0,17A	19,52V 0,18A	19,31V 0,18A	18,23V 0,17A	17,07V 0,16A
Água	18,58V 0,17 ^a	18,39V 0,17A	19,79 0,18	20,16V 0,18A	20,34V 0,19A	20,26V 0,18A	19,08V 0,17A	18,01V 0,17A
Horário	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Solo	16,12V 0,15 ^a	15,67V 0,14A	12,85V 0,12A	7,63V 0,07A	5,37V 0,05A	4,17V 0,04A	3,23V 0,03A	2,15V 0,02A
Água	16,87V 0,16 ^a	16,27V 0,15A	13,46V 0,12A	7,96V 0,07A	5,48V 0,05A	4,20V 0,04A	3,22V 0,03A	2,16V 0,02A

Tabela 4 - Dados de Tensão e Corrente coletados com arrefecimento

Fonte: os autores

Para os cálculos de potência elétrica média gerada, são utilizados os valores de tensão e corrente para cada um dos horários de medição, de acordo com a Equação 1 apresentada abaixo. Tal cálculo é aplicado para os valores medidos apresentados nas Tabelas 3 e 4. Finalmente os valores de eficiência são calculados. Para tal nas potências médias da Tabela 3, utiliza-se a Equação 2, em que a potência média 2 é o valor de referência, ou seja, sem a utilização de refletor (espelho). De forma análoga é realizado o cálculo de eficiência da técnica de arrefecimento com água, tomando-se por base, ou a potência média 2, a gerada pela placa sobre o solo. Finalmente, os resultados obtidos são então apresentados na Tabela 5.

$$\text{Potência média} = (V1.I1 + V2.I2 + \dots + Vn.In) / n \quad (1)$$

$$\text{Eficiência (\%)} = [(Pot. Média 1 - Pot. Média 2) / (Pot. Média 2)].100 \quad (2)$$

	Sem Refletor	Com Refletor	Eficiência
Potência Média e Eficiência baseada na Média	2,03 W	2,16 W	6,70%
Horário de Maior Eficiência Instantânea (16h30)	78,4 mW	96,8 mW	23,40%
Horário de Menor Eficiência Instantânea (10h30)	3,49 W	3,69 W	5,82%

	Placa no SOLO	Placa na AGUA	Eficiência
Potência Média e Eficiência baseada na Média	1,47 W	1,59 W	8,41%
Horário de Maior Eficiência Instantânea (10h)	28 mW	31,6 mW	14,11%
Horário de Menor Eficiência Instantânea (17h30)	43 mW	43,2 mW	0,46%

Tabela 5 - Valores de Potência Média, Eficiência Média e Instantânea (e horário)

Fonte: os autores

Com o propósito de se comparar a relação entre cada equipamento ou método foi considerado uma placa fotovoltaica padrão para instalação em residências, sendo selecionado uma placa de 395W tipicamente usada com capacidade de geração média de 1,2kWh/dia, as características da placa podem ser observadas na Tabela 6 (NEOSOLAR, 2020).

Característica	Valor
Potência Máxima (Pmax)	395 W
Tensão Máxima Potência (Vmp)	40,2 V
Tensão Circuito Aberto (Voc)	49,1 V
Corrente Máxima Potência (Imp)	9,83 A
Corrente de Curto Circuito (Isc)	10,31 A
Temperatura Referência (T0)	25 °C
Medidas	2000x992x40 mm
Peso	22500 g

Tabela 6 - Características da placa de 395W

Fonte: (NEOSOLAR, 2020)

A Tabela 7 contém a comparação da relação entre investimento inicial (custo dos sistemas), aumento de eficiência e custos adicionais de cada uma das técnicas e equipamentos apresentados no referencial teórico (*tracker*, nas duas primeiras linhas) e nos ensaios realizados (duas últimas linhas – uso de refletor e refrigeração). Não foi possível realizar os ensaios práticos com o sistema *tracker* de 1 eixo e 2, em função das limitações impostas no período de execução do corrente trabalho (COVID). Os valores dos preços de investimento inicial e custos de manutenção foram coletados da internet sendo realizado uma média entre 3 a 5 produtos de cada item. Para a tabela foi considerado apenas custos

de equipamentos e suportes, não foi incluso mão de obra para instalação de nenhum item.

	Investimento Inicial	Aumento de Eficiência	Custos Adicionais por mês
Tracker 1 eixo	R\$ 212,30	22,00%	Aprox 0,15% da geração
Tracker 2 eixos	R\$ 441,15	39,00%	Aprox 0,2% da geração
Refletor	R\$ 70,00	6,70%	R\$ 0,00
Arrefecimento	R\$ 200,00	8,41%	R\$ 0,00

Tabela 7 - Investimento necessário e melhora na eficiência de geração

Fonte: os autores

Para a proposição de valores apresentados na Tabela 8:

- Considerou-se a placa comercial típica de 395W. O custo médio adotado para a placa é de R\$1052,55, de acordo com NEOSOLAR (2020), e seu suporte de instalação em R\$220,71.
- Para cálculos de consumo e custo de geração, considerou-se o valor do kWh de R\$0,653 que é o valor da tarifa branca intermediária da Enel SP, distribuidora da cidade de São Paulo. (ANEEL, 2020)
- Para os cálculos, adotou-se a eficiência apresentada na Tabela 7 para os diversos métodos. Sabe-se que, para as mesmas referências de padrão de instalação, as eficiências obtidas para placas de mesmo material são as mesmas (DOS SANTOS GONÇALVES, 2020).
- Na coluna de investimento inicial foi realizada a soma do investimento inicial do equipamento mais o custo da placa fixa.
- Por fim, sabendo da Tabela 6 que a sua capacidade de geração estática (última linha da Tabela) é de 1,2 kWh/dia (placa fixa), realizaram-se os cálculos, respeitando os requisitos comentados.
- Para as comparações na próxima Seção, utiliza-se então o valor e características de geração da placa fixa (instalação padrão) como a referência para entender o suporte que os demais métodos de otimização de geração apresentados impactam no retorno do investimento final.

	Investimento Inicial	Geração de energia	Tempo de Retorno
<i>Tracker 1 eixo</i>	R\$ 1.485,56	43,87 kWh/mês	51,86 meses
<i>Tracker 2 eixos</i>	R\$ 1.714,41	49,97 kWh/mês	52,54 meses
Refletor	R\$ 1.343,26	38,41 kWh/mês	53,56 meses
Arrefecimento	R\$ 1.473,26	39,03 kWh/mês	57,80 meses
Placa Fixa	R\$ 1.273,26	36,00 kWh/mês	56,14 meses

Tabela 8 – Investimentos necessários, geração média mensal e tempo de retorno estimado.

Fonte: os autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os dados apresentados na Tabela 8 é possível verificar que o acoplamento de espelhos e o uso do *Tracker* com 1 eixo de rotação auxiliam a diminuir o prazo para obter o do retorno de investimento da instalação. Sendo assim, a construção de um protótipo ideal, deve utilizar essas duas técnicas em conjunto. Na Tabela 9 é então apresentada a comparação entre o ROI de uma placa fixa e o ROI estimado da junção entre o acoplamento de espelhos e o *Tracker* com 1 eixo de rotação, baseado nas informações da Tabela 7. O protótipo então apresentaria uma diminuição de 6 meses no retorno de investimento em relação a instalação de uma placa fotovoltaica fixa.

	Investimento Inicial	Geração de energia	ROI
Protótipo	R\$ 1555,56	46,86 kWh/mês	4 anos e 3 meses
Placa Fixa	R\$ 1273,26	36 kWh/mês	4 anos e 9 meses

Tabela 9 - Relação entre o protótipo idealizado e uma placa solar fixa.

Fonte: os autores

É possível verificar que o acoplamento de espelhos obteve os melhores resultados em horários de menores incidência de raios solares 16h30, por outro lado, a técnica de arrefecimento obteve os melhores resultados em horários de alta incidência solar 10h, horários onde a temperatura tende a ser mais alta.

Vale comentar que o investimento inicial para se realizar a instalação de um sistema solar e sua manutenção constituem obstáculos para que o uso da energia solar seja difundido mais rapidamente. Este custo naturalmente depende de materiais e mão de obra especializada. Quanto mais empresas especializadas em um cenário competitivo como este estiverem atuando, a tendência é que tais custos sejam mais agressivos, reduzindo o ROI estimado como sumário na Tabela 9.

Outro fator que precisa ser levado em consideração é o preço do kWh da região. Para as discussões do corrente trabalho, foi considerado um kWh de R\$0,653 (ANEEL, 2020). Sabe-se que em algumas regiões e dependendo da época do ano esse valor pode ser consideravelmente maior (ANEEL, 2020). E, desta forma, quanto maior for o preço do kWh mais atrativo se tornam esses equipamentos e técnicas que melhoram a geração da placa.

Para a instalação com arrefecimento, cujo ROI não foi interessante, cabem alguns comentários. Para o protótipo, simplesmente considerou-se um recipiente de tamanho próximo aos das dimensões da placa e com espessura determinada. Porém, neste caso, não existe a circulação de água, que poderia melhorar ainda mais a refrigeração da placa e seu conseqüente desempenho. Cabe ressaltar que o arrefecimento de placas fotovoltaicas pode ter um preço consideravelmente variável, dependendo da técnica e local

a ser trabalhado. Isto ocorre com o exemplo mencionado na Figura 4, que poderia ter a infraestrutura inicial de suportes de instalação um pouco mais cara, porém alavancar a capacidade de geração do sistema, pela livre circulação e água. Vale dizer então, que este é um processo que pode ainda ser amadurecido e padronizado em padrões construtivos pelas empresas do setor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No corrente trabalho foram estudados e evidenciados os diversos métodos preconizados para aumentar a eficiência de geração de energia de placas fotovoltaicas. Foram estudados, ensaiados e analisados em particular: a utilização de espelhos refletores acoplados, direcionamento de placas através de mecanismos com um ou dois graus de liberdade (*trackers*), arrefecimento do dispositivo com água. Para cada método sugerido, elaborou-se um protótipo ou modelo fotovoltaico de referência e foram comparados os resultados de geração com outro, em que cada método foi aplicado. Os resultados de geração foram apresentados e discutidos. Em sequência, procedeu-se a extrapolação dos resultados considerando placas fotovoltaicas tipicamente instaladas comercialmente. Os custos foram levantados e dadas a diferenças na geração, os melhores métodos foram identificados. Pelos resultados obtidos, chega-se a conclusão que o uso de *tracker* com 1 grau de liberdade e espelhos devem ser usados para otimizar a geração e conseqüentemente reduzir o ROI do projeto. Nas condições ponderadas, o ROI da instalação fotovoltaica foi melhorado em 6 meses. Por outro lado, o uso de arrefecimento nas condições prototipadas não se mostrou eficiente.

Para trabalhos futuros, seria interessante o estudo de outras formas de arrefecimento de placa, como alguma forma alternativa de diminuir a temperatura da placa em lugar sem acesso a água em abundância. Sugere-se a utilização de algum tipo de gel de arrefecimento ou o uso de sistemas com fluxo de ar para retirar calor da placa. Outro aspecto que poderia ser abordado são as formas alternativas para o controle dos sistemas de seguidor solar, utilização de microcontroladores de baixo custo, a fim de reduzir os valores de investimentos inicial desse equipamento.

APOIO

PIVIC Mackenzie.

REFERÊNCIAS

ANEEL, **Relatório de Tarifas 2020**. Acessado em 18 de setembro de 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorio-ranking-tarifas>>

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados á rede**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes de; RANK, Narah luata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BLASZCZAK, Vinícius. **Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar**. Universidade Federal da Fronteira Sul. 2017.

CORNELIUS, Richard Gonçalves; BENDER, Vitor Cristiano; MAIA, Amanda Costa. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA REFLEXÃO DE ESPELHOS. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 8, n. 2, 2017.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro et al. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto. 2013.

DA SILVA, Vinícius Oliveira et al. **Análise técnica para concepção/projeto de usina solar fotovoltaica arrefecida em UHE**. Universidade de São Paulo, 2016.

DA SILVA LEMOS, Luã; RAMOS, Maiane. Aplicação do Sistema Tracker em estruturas de Rastreo Solar. **Boletim do Gerenciamento**, v. 16, n. 16, p. 60-74, 2020.

DOS PASSOS, David et al. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PLACAS FOTOVOLTAICAS (PROJETO SEGUE O SOL). **Maiêutica-Engenharias**, v. 3, n. 01, 2017.

DOS REIS, João Rodrigo Leitão; FARIA, Ivani Ferreira; FRAXE, Therezinha de Jesus Pinto. Geoconservação e Geoturismo na Amazônia. **Revista Turismo Em Análise**, v. 31, n. 1, p. 50-76, 2020.

DOS SANTOS GONÇALVES, Paulo Vitor et al. O NEXUS ENERGIA-ÁGUA NA ECONOMIA CIRCULAR URBANA: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE BELÉM, PARÁ, BRASIL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 308-326, 2020.

ENERGÉTICA, EPE EMPRESA DE PESQUISA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Relatório síntese, ano base 2018. **Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia**, 2019.

FIEP, Federação das Indústrias do Estado do Paraná, **Como está e até onde pode ir a energia limpa no Brasil**, 2018.

GOVB, Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira, **Governo do Brasil**, 21 de jan. 2020. Disponível em: <[JENA, S.P. Jena, S.K. Acharya, C. Deheri. **Performance Analysis of a SelfActivating Solar Tracking Setup**, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology \(IJRASET\), 2015.](https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira#:~:text=Fontes%20de%20energia%20renov%C3%A1veis%20representam%2083%25%20da%20matriz%20el%C3%A9trica%20brasileira,-No%20Brasil%2C%20as&text=O%20Brasil%2C%20atualmente%2C%20tem%2083,Minas%20e%20Energia%2C%20Reive%20Barros.></p></div><div data-bbox=)

JURINIC, Francesco. Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento. 2020.

KRUANGAM, Dusit et al. Growth of Photovoltaic Industry and Market in Thailand, A Case Study of Solartron PCL. In: **2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference**. IEEE, 2006.

MATTOS, Gustavo Marques. Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ**, 2016.

NASCIMENTO, Francisleile Lima. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ENERGIA ALTERNATIVA E SUSTENTÁVEL PARA O ESTADO DE RORAIMA-RR. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 1, n. 3, p. 25-34, 2020.

NEOSOLAR. **Painéis Solares**. Disponível em: https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-395w-ulica-ul-395m-144.html?gclid=Cj0KCCQjw-uH6BRDQARIsAI3l-UdoU3X-tsJIYLWfLKGBpQwYt7rsP-Li1y0ttVsMANSPPp8ZI7Wuo-XAaAtY7EALw_wcB. Acessado em 19/set./2020.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2014.

SILVA, **Estudo de perdas em sistemas fotovoltaicos**, Pedro Henrique Tronco Silva, Fabiana Florian, Fernando Augusto Baptistini Pestana, Universidade de Araraquara, 2014.

TREVELIN, Felipe Camargo; GESUALDO, E. Estudo Comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. **Monografia (Graduação)–Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos**, 2014.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Algoritmo evolucionário adaptativo 109, 112, 113
Antenas 159, 160, 161, 164
Ar condicionado 87, 88, 132, 133, 134, 135, 136, 139, 141, 143
Automação avançada da distribuição 69

B

Balanceamento de carga nas fases 29
Biocombustível 173, 178

C

Ciber-físico 69, 73, 80
Consumo de energia elétrica 40, 56, 59, 62, 82, 85, 117, 133
Controladores suplementares 41, 47, 51, 52
Controle preditivo 132

D

DRA 159, 160, 161, 163, 165

E

Eficiência energética 55, 56, 57, 59, 61, 65, 67, 68, 82, 90, 117, 119, 130, 133, 143
Emulador de redes 69, 70, 71, 72, 79, 81
Estabilidade a pequenas perturbações 41, 42, 48
Estabilizadores de sistema de potência 41, 42
Estimação de estados 109, 110, 111, 115

F

Fluxo de potência 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 54, 72, 73, 113

G

Generalize unified power flow controller 41, 42
Gestão da energia 68, 82, 84, 88, 90
Gestão de energia elétrica 56

H

Hardware-in-the-loop 69, 72

M

Manutenção 2, 41, 118, 126, 128, 167, 168, 169, 170, 171, 172

Método de Newton-Raphson 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 26

Método de soma de correntes 15, 19

Método PLL 1

Micro-ondas 159, 160, 162, 165

Modelo de Hammerstein 145, 149

O

Óleo vegetal 173

Otimização 41, 42, 59, 61, 84, 117, 119, 121, 127, 130, 133, 137, 138

Otimização por enxame de partículas 41

P

PID-IMC 132, 133, 139

Placa fotovoltaica 117, 119, 120, 121, 122, 126, 128

PMU 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116

R

Recursos públicos 56

Redes de petri hierárquicas temporizadas 29

S

Simulações de sincronismo 1

Sincronização de geração distribuída 1

Sistema de localização indoor 145

Sistema elétrico 1, 2, 3, 14, 27, 41, 109, 110, 111, 113, 114, 115, 167, 170, 172

Sistemas de distribuição de energia elétrica 15

Sistemas elétricos 2, 14, 16, 41, 70, 72, 109, 111, 115

Smart grids 29, 69, 81

Sohxlet 173

Sustentabilidade 59, 82, 83, 85, 90, 117, 130

T

Termografia 167, 169, 172

Termovisor 167

Transformadas de Clarke e Park 1, 3

Trilateração 145, 147, 148, 149, 154

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

2

-  www.atenaeditora.com.br
-  contato@atenaeditora.com.br
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 **Atena**
Editora
Ano 2021