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 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

Atena Editora
Ano 2021

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 Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
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

Atena Editora
Ano 2021

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

Atena Editora
Ano 2021

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 Gonçalo 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 DrªFernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

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 Andreza 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

Atena Editora
Ano 2021

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 Atílio 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/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
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 Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
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

Atena Editora
Ano 2021

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

Atena Editora
Ano 2021

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Atena Editora
Ano 2021

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.

Atena Editora
Ano 2021

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 porem 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 espirito 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 Sarmento 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 Morais

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 1

FUSÃO DE SENSORES INERCIAIS BASEADA EM FILTRO DE KALMAN

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 02/02/2021

Carolina Barbosa Amaro Dias
Universidade de São Paulo
São Carlos - São Paulo
http://lattes.cnpq.br/6922601814968200

RESUMO: É perceptível, hoje em dia, a crescente tendência e necessidade de se integrar o mundo digital ao mundo real, seja num contexto de entretenimento, medicina, segurança, robótica, entre muitos mais. Um dos dispositivos responsáveis pela tradução de dados de um ambiente para outro são os sensores, que captam informações do mundo físico e as convertem em grandezas compreensíveis para um computador que, então, pode interpretá-las e processá-las tendo em vista um objetivo. Os sensores, no entanto, são suscetíveis a erros que podem afetar, em vários níveis de gravidade, o resultado das aplicações em que estão envolvidos. Para contornar esse tipo de problema, algumas técnicas foram desenvolvidas, dentre as quais está o filtro de Kalman, cuja implementação é feita em *software*. O filtro consiste num conjunto de equações matemáticas que aumenta a eficiência do algoritmo de aquisição de dados realizando uma combinação ponderada das informações advindas dos sensores. O objetivo final desse projeto foi a validação da utilização do filtro de Kalman para obtenção de dados mais precisos para o contexto da fusão de um acelerômetro e um giroscópio.

PALAVRAS - CHAVE: robótica, sinais, sensores

INERTIAL SENSORS FUSION BASED ON KALMAN FILTER

ABSTRACT: It is evident, nowadays, the growing trend and necessity to merge the digital world to the real world, it can be seen when it comes to entertainment, medicine, safety, robotics, among many more. One of the devices responsible for translating data from one environment to another are the sensors, which capture information from the physical world and convert it into palpable quantities for a computer, which then can interpret and process it in order to achieve a certain goal. Sensors, however, are prone to errors that can affect, at various levels of severity, the result of the applications in which they are involved. To avoid this type of problem, some techniques have been developed, one of which is the Kalman filter, which is implemented *via* software. The filter consists of a set of mathematical equations that increases the efficiency of the data acquisition algorithm by performing a weighted combination of information from the sensors. The goal of this project was to validate the use of the Kalman filter to obtain more accurate data when combining an accelerometer and a gyroscope.

KEYWORDS: robotics, signals, sensors

1 I INTRODUÇÃO

O progresso das áreas de ciência dos materiais e da engenharia foram cruciais para o desenvolvimento de sensores – dispositivos capazes de prover uma saída aproveitável em

resposta a uma grandeza medida. O desenvolvimento e aperfeiçoamento de sensores é importante em diversos contextos relacionados ao progresso da tecnologia de maneira global (EROR *et al*, 1995).

Atualmente, em geral, sensores geram sinais de natureza elétrica, frequentemente aplicados a técnicas de controle digital. Estão presentes, por exemplo, nos avanços da medicina, tanto para o diagnóstico quanto para o tratamento, para segurança e monitoramento de uma maneira geral, além de controle num ambiente industrial (ELECTROCHEM, 2020).

Para descrição da performance de um sensor são levados em consideração parâmetros como sua sensibilidade, precisão e linearidade. Um parâmetro que tem muita influência sobre o êxito de suas aplicações é sua exatidão, que descreve a diferença entre o real valor da grandeza medida e o valor indicado pelo instrumento (CARR & BROWN, 1981). Na prática, não há sensor cuja exatidão é perfeita e cujas medidas não são afetadas por ruídos. Por isso, diversas estratégias foram desenvolvidas para conferir maior confiabilidade aos dados coletados.

Uma dessas técnicas é o filtro de Kalman, método bastante utilizado quando se deseja atenuar o efeito de ruídos via *software*. Ele consiste num conjunto de equações matemáticas que fazem a predição do estado desejado e correção desse valor a partir da medição em si. Esse algoritmo também é muito utilizado para combinação das medidas de dois ou mais sensores de maneira ponderada para melhor estimativa das variáveis desejadas, estratégia conhecida como fusão de sensores (OLIVEIRA & GONÇALVES, 2017).

Nesse projeto, foi estudada a aplicação do algoritmo do filtro de Kalman para fusão de dois dos sensores que compõem as unidades de medidas inerciais (IMUs) – o acelerômetro e o giroscópio – de forma a estimar os valores de dois dos três ângulos que descrevem a atitude de um objeto: a rolagem (representada por ϕ) e a arfagem (representada por θ). Os sinais foram obtidos de em ambiente simulado, com o *software* V-REP, e posteriormente processados utilizando-se o *software* Matlab.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Algoritmo do Filtro de Kalman

O algoritmo do filtro de Kalman é aplicado a sistemas cujo modelo representado no espaço de estados é do tipo:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases}$$

A primeira equação representa o modelo do processo. Nela, *x* é o vetor contendo as variáveis de estado e *A* relaciona o valor da variável *x* no instante atual (*k*) ao no próximo instante (*k*+1). A matriz *B* relaciona a variável de controle *u* a *x*. Para as aplicações desenvolvidas nesse projeto, o termo foi omitido, pois não há ação de controle. *w* é a variável de ruído de processo, adicionada para representar a incerteza de conhecimento pleno do modelo.

A segunda equação representa o modelo de medição. A matriz *H* relaciona a variável de estado, *x*, ao valor medido, *z*. O parâmetro *v* representa o ruído relacionado ao processo de medição feito pelos sensores (WELCH & BISHOP, 2001).

A partir dos parâmetros *w* e *v*, obtém-se as *Q* e *R*, matrizes diagonais constituídas pela variância dessas variáveis, respectivamente (KIM, 2010). Isso conclui o conjunto de todas as variáveis externas ao algoritmo.

As variáveis para cálculos internos são *K*, o ganho de Kalman, e *P*, a covariância do erro. A matriz *K* é utilizada para ponderação de *z* e do valor previsto de *x* (cuja notação é) para cálculo da estimativa de *x*. A matriz *P* é a representação numérica da acurácia da estimativa de *x* com relação a seu valor real (KIM, 2010).

Uma vez definidas as variáveis envolvidas no algoritmo, os passos que compõem esse processo se seguem da seguinte forma:

PASSO 0: Definição dos valores iniciais para *x* e *P* (x_0 e P_0)

PASSO 1: Predição do estado de *x* e da covariância do erro (*P*)

$$x_k^- = Ax_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

PASSO 2: Cálculo do ganho de Kalman (*K*)

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

PASSO 3: Estimativa do valor de *x*

$$x_k = x_k^- + K_k(z_k - Hx_k^-) \quad (4)$$

PASSO 4: Atualização da covariância do erro (*P*)

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (5)$$

PASSO 5: Retorno ao PASSO 1, com novo valor de *z*

2.2 A Fusão dos Sensores

2.2.1 A Adaptação do Modelo Original

Decidiu-se que a implementação inicial do algoritmo de fusão de sensores seria feita de acordo com o modelo proposto em (KIM, 2010). Em vez de utilizar diretamente os ângulos ϕ e θ como variáveis de estado *x*, optou-se por utilizar as medidas dos ângulos em quatérnios (*q1*, *q2*, *q3* e *q4*) para uma representação mais simples da modelagem do processo considerando as grandezas medidas pelos sensores.

A tradução dos ângulos para esse novo sistema de coordenadas se dá pela equação (6). Vale observar que, apesar do ângulo ψ estar representado na equação, ele não será utilizado. Assim, a equação é aplicada com ψ = 0.

$$\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \\ q4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \end{pmatrix} \tag{6}$$

Utilizando a representação em *q1*, *q2*, *q3* e *q4*, a relação entre as velocidades angulares e taxa de variação dos ângulos em quatérnios se dá pela equação (7).

$$\begin{pmatrix} \dot{q1} \\ \dot{q2} \\ \dot{q3} \\ \dot{q4} \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \\ q4 \end{pmatrix} \tag{7}$$

Essa equação, em tempo discreto, é representada por (8), em que *Δt* é o tempo de amostragem utilizado. Assim, obtém-se a equação de modelo do processo:

$$\begin{pmatrix} q1_{k+1} \\ q2_{k+1} \\ q3_{k+1} \\ q4_{k+1} \end{pmatrix} = \left[I + \Delta t\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix}\right]\begin{pmatrix} q1_k \\ q2_k \\ q3_k \\ q4_k \end{pmatrix} \tag{8}$$

O que significa que:

$$A = \left(I + \Delta t \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \right) \quad (9)$$

A variável *z* foi alterada para que a equação de modelo de medição utilizada estivesse de acordo com (7), ou seja, as medidas também foram convertidas para quatérnio, resultando em:

$$z_k = Ix_k + v_k \quad (10)$$

Uma vez definido o modelo do sistema como um todo, a fusão de sensores se deu da seguinte forma:

PASSO 1: Cálculo dos valores de ϕ e θ a partir dos valores medidos pelo acelerômetro. Nas equações abaixo, admitiu-se a aceleração da gravidade *g* como 9,8m/s^2

$$\theta = \operatorname{asin} \frac{a_x}{g} \quad (11)$$

$$\phi = \operatorname{asin} \frac{-a_y}{g \cos\theta} \quad (12)$$

PASSO 2: Converte-se os valores calculados para ϕ e θ para quatérnio pela relação descrita por (6). Esses valores serão o *z* aplicado ao algoritmo do filtro, sendo atualizados a cada iteração

PASSO 3: Uma vez estimados os valores de *x* a partir das medidas do acelerômetro, calcula-se a matriz *A* com as medidas do giroscópio com (9)

PASSO 4: Utiliza-se os valores de *q1*, *q2*, *q3* e *q4* estimados no PASSO 2 e a matriz *A* calculada no PASSO 3 para o algoritmo do filtro de Kalman, cujos passos foram descritos na seção 2.1

2.2.2 O Algoritmo de Otimização

A performance do filtro de Kalman está intimamente ligada à adequação dos valores de *Q* e *R* à descrição do sistema. No entanto, o comportamento do ruído de processo e de medição são, muitas vezes, difíceis de se estimar com muita certeza. Por isso, no

geral, eles são encarados como parâmetros a serem regulados ao problema (LAAMARI; CHAFAA; ATHAMENA, 2015).

Inicialmente, os valores adotados foram escolhidos manualmente e alterados com base em tentativas e erro, mas considerando-se a infinidade de valores a serem testados e a incapacidade em se perceber um padrão de resposta de estimação coerente, optou-se por utilizar um algoritmo de otimização para escolha dos valores *Q* e *R*. A estratégia utilizada foi a de otimização por enxame de partículas.

A otimização por enxame de partículas é uma estratégia desenvolvida em 1995 por Eberchart e Kennedy que tem por base o compartilhamento de informações entre indivíduos pelo bem do coletivo, conceito estudado pela ciência da Sociobiologia (KENNEDY & EBERHART, 1995). Nas palavras do sociobiólogo E. O. Wilson:

> Em teoria pelo menos, membros individuais do bando podem se beneficiar de descobertas e experiências prévias de todos os outros membros do bando quando procuram por comida. Essa vantagem pode se tornar decisiva, superando as desvantagens da competição por alimento, quando os recursos estão distribuídos de maneira imprevisível (WILSON, 1975, tradução nossa).

No contexto da otimização global computadorizada, em vez da busca por alimento, o que se procura é o ponto de máximo ou mínimo global de uma função objetivo e, em vez de animais reais, usa-se indivíduos digitais (TÖRN & ŽILINSKAS, 1989). Nesse projeto, procurou-se minimizar a diferença entre os sinais reais que representam as atitudes de um robô e aqueles estimados pelo filtro de Kalman. Assim, a função minimizada foi o erro absoluto entre eles.

Cada partícula do enxame (ou indivíduo da população) tem dois atributos: sua posição (x_i, em que cada i representa uma partícula diferente) e sua velocidade (v_i). A posição da partícula representa o ponto em que ela se encontra na função objetivo e a velocidade indica a direção e sentido em que a partícula se movimenta pelo relevo da função (LAAMARI; CHAFAA; ATHAMENA, 2015), no caso, a função que descreve a diferença entre o valor real e o calculado da atitude do robô.

A execução desse algoritmo se dá da seguinte forma:

Na primeira iteração, cada partícula do enxame tem seus atributos definidos aleatoriamente. As partículas têm suas posições atualizadas: a nova posição da partícula é a soma de sua posição inicial à velocidade que lhe foi atribuída (grandeza vetorial).

Caso nova a posição da partícula corresponda a um relevo mais baixo do que o anterior, armazena-se essa posição como o melhor desempenho pessoal (P_{best_i}). Para cada iteração e para cada indivíduo, esse valor é atualizado se a movimentação acarretou uma diminuição do valor do erro.

Concomitantemente, armazena-se o melhor desempenho considerando-se todas as iterações e o enxame como um todo (G_{best}) – esse passo é o que relaciona o algoritmo ao conceito de compartilhamento da Sociobiologia.

Ao fim da iteração, ou seja, quando todas as partículas já têm suas posições atualizadas, e estão definidos $Pbest_i$ e *Gbest*, são calculadas as velocidades a serem utilizadas na próxima iteração. Isso se dá pela equação (13).

$$v_i(k+1) = w \times v_i(k) + c_1 \times r_1(k) \times (P_{best_i}(k) - x_i(k)) + c_2 \times r_2(k) \times (G_{best}(k) - x_i(k)) \quad (13)$$

Na equação acima, é evidente que a velocidade que uma partícula terá na próxima iteração é resultante de uma combinação de três termos, visualmente representados na figura 1.

O primeiro é w x $v_i(k)$, em que $v_i(k)$ é a velocidade atual atribuída à partícula, e *w* é a variável de inércia que, quanto maior for, mais a velocidade atual influenciará a próxima (EBERHART & SHI, 2000). Esse componente é representado pela seta preta na figura 1.

O segundo termo é $c_1 \times r_1(k) \times (P_{best_i}(k) - x_i(k))$, chamado de componente cognitiva, representa a experiência individual, em verde na figura 1. Esse produto resulta num vetor partindo da atual posição da partícula até a sua posição de melhor desempenho (seta verde pontilhada na figura 1). O fator c_1 é uma variável que representa uma aceleração positiva e r_1, um valor randômico entre zero e 1.

O último termo é $c_2 \times r_2(k) \times (G_{best}(k) - x_i(k))$ chamado de componente social, representa a troca de informações entre membros do enxame, em azul na figura 1. Esse produto resulta num vetor partindo da atual posição da partícula até a posição de melhor desempenho do grupo como um todo (seta azul pontilhada na figura 1). Como para a componente individual, o fator c_2 representa uma aceleração positiva e r_2, um valor randômico entre zero e 1 (TRIPATHI & JENA, 2016).

Uma vez calculada a velocidade da partícula na próxima iteração, ela é movimentada de acordo com a equação (14).

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (14)$$

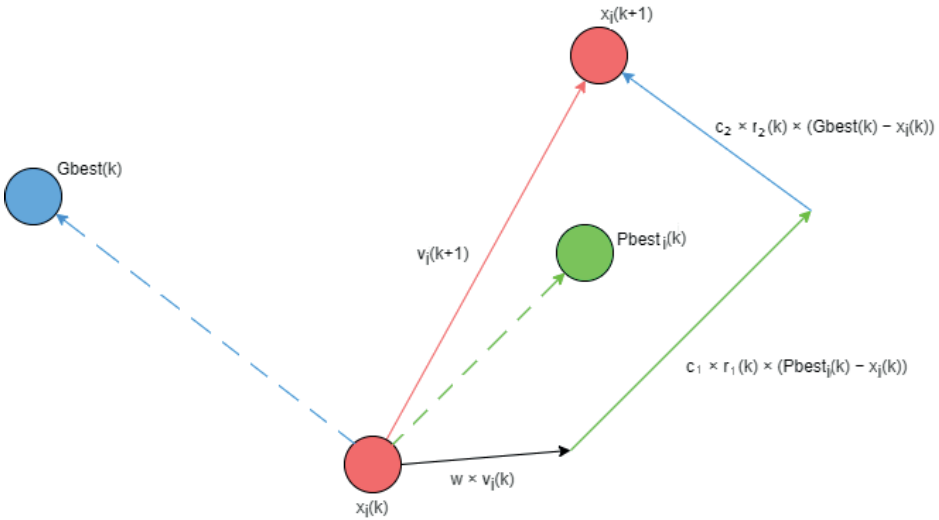


Figura 1: Representação dos componentes envolvidos na movimentação de uma partícula (Adaptado de MACEDO, 2020)

3 | RESULTADOS

3.1 Estimativa de Medida dos Sensores

O primeiro item a ser desenvolvido no projeto foi a estimativa das variáveis dos sensores através do filtro de Kalman, ou seja, o algoritmo foi aplicado às medidas dos sensores separadamente para que se obtivesse dados com menor ruído.

No entanto, como esse projeto foi desenvolvido apenas em simulação (cujos sensores não possuem erro de medição), o ruído foi adicionado artificialmente. Escolheu-se a adição de um ruído branco gaussiano aditivo que resultasse numa SNR de 2dB.

As equações gerais descritas na seção 2.1 foram utilizadas da seguinte forma:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ix_k + w_k \\ z_k = Ix_k + v_k \end{cases}$$

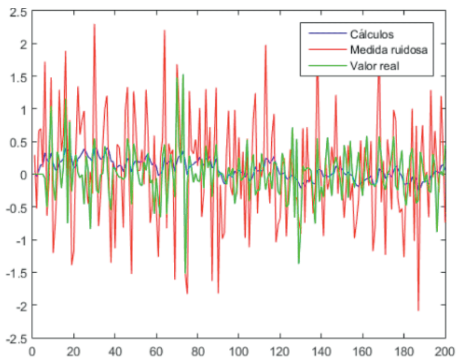
A variável de estado – o valor a ser estimado – foi escolhida como sendo o próprio valor medido pelo sensor. Por isso, fez-se *H* como sendo uma matriz identidade. Para a escolha da matriz *A*, tomou-se a decisão de presumir que o valor medido pelos sensores varia pouco entre o instante *k* e o instante *k*+1. Assim, a matriz *A* utilizada também foi uma matriz identidade.

Os dois sinais obtidos como resultado dessa aplicação estão representados nas figuras 2(a) e 2(b). Para uma mesma coluna, as três imagens representam um eixo do sensor: para o acelerômetro, esses eixos são *x*, *y* e *z* e para o giroscópio, *p*, *q* e *r*.

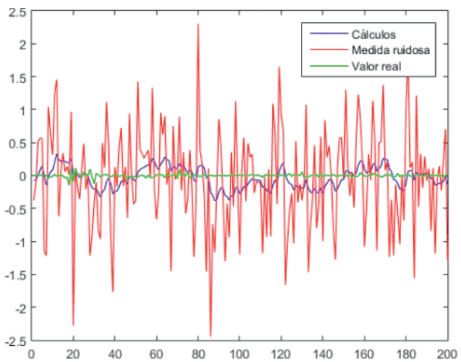
Considerando uma mesma linha, as duas primeiras imagens correspondem aos sinais simulados e calculados, e a última, ao erro absoluto entre o sinal simulado (sem ruído) e o valor previsto pelo filtro de Kalman. A tabela 1 abaixo resume os valores médios de erro absoluto encontrados para cada uma das medidas.

Grandeza	Erro médio absoluto
a_x	0.2920
a_y	0.1669
a_z	0.7152
p	0.1401
q	0.6198
r	0.1309

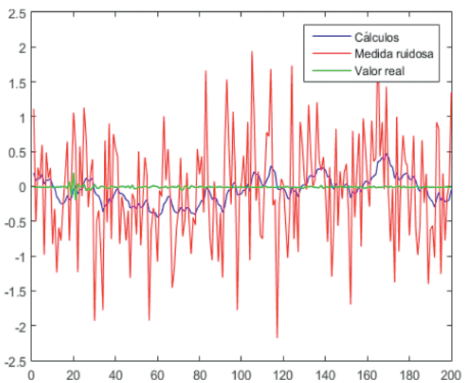
Tabela 1: Erro médio absoluto das estimações do filtro de Kalman



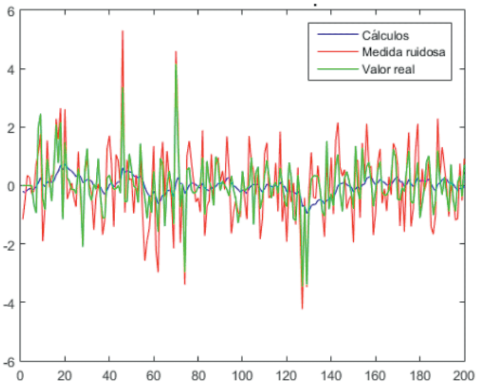
(a) Sinais referentes a a_x



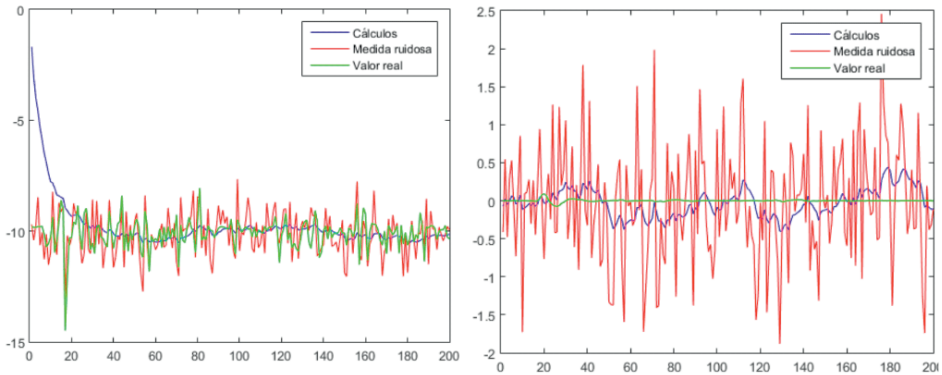
(b) Sinais referentes a p



(c) Sinais referentes a a_y



(d) Sinais referentes a q



(e) Sinais referentes a a_z

(f) Sinais referentes a r

Figura 2: Resultados do uso do filtro de Kalman para os sinais provenientes do acelerômetro e giroscópio

3.2 Fusão de Sensores

O método da fusão de sensores foi aplicado para cálculo dos ângulos de rolagem (ϕ) e arfagem (θ) conforme descrito na seção 2.2. Cabe observar que as medidas utilizadas para essa seção foram aplicadas diretamente do *V-REP*, sem a adição de ruído, diferentemente da seção anterior.

O algoritmo de otimização por enxame de partículas foi executado 100 vezes com o objetivo de encontrar os valores mais frequentes para Q e R, a fim de evitar mínimos locais. A figura 3 representa um histograma normalizado desses valores.

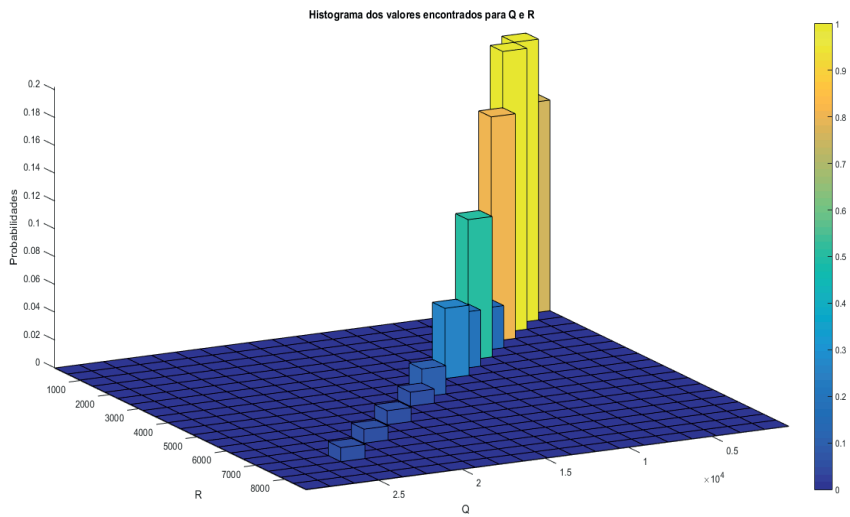
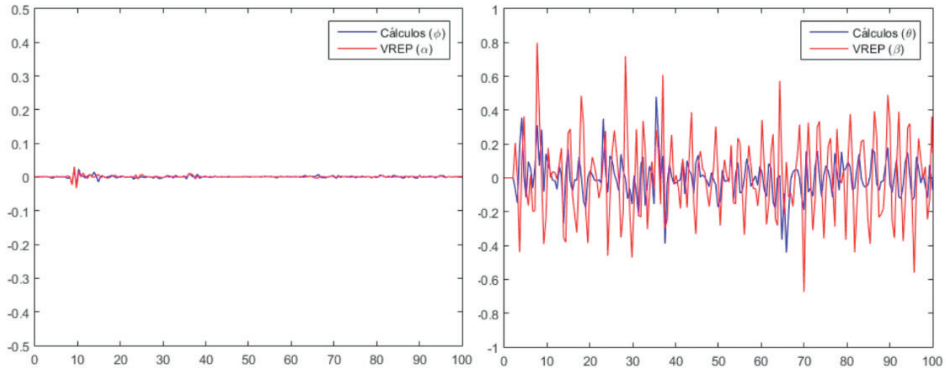


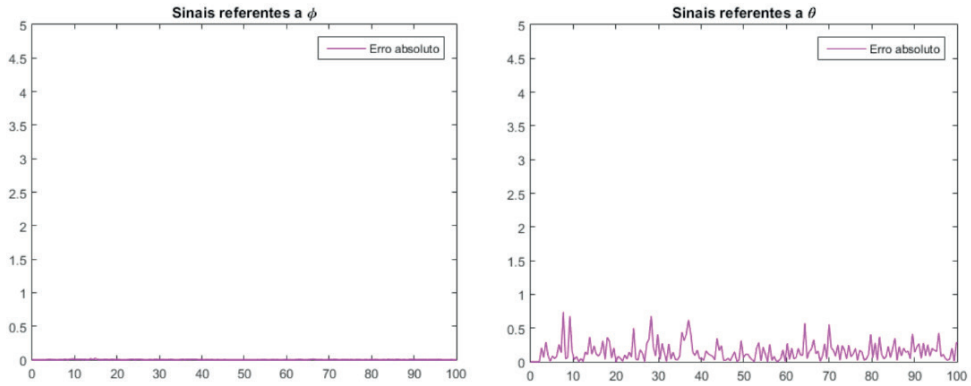
Figura 3: Valores mais comuns de R e Q pela otimização

Apesar de haver mais valores de *R* perto de 2000 e *Q*, de 4000, todos os pares encontrados pelo algoritmo de otimização tiveram o mesmo erro: 17.006. Assim, os valores *Q* e *R* escolhidos foram 441.17 e 131.19, respectivamente – um dos pares encontrados pelo algoritmo. As figuras 4(a) e 4(b) representam os valores das grandezas ϕ e θ estimados pelo filtro de Kalman, enquanto 5(a) e 5(b), os respectivos erros absolutos.



(a) Sinais referentes a φ (b) Sinais referentes a θ

Figura 4: Resultado do filtro de Kalman para fusão de sensores



(a) Sinais referentes a φ (b) Sinais referentes a θ

Figura 5: Erro absoluto entre estimativa pelo filtro de Kalman e valor real

4 I CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao uso do algoritmo do filtro de Kalman unicamente para minimização do efeito de ruído nos sinais, conforme feito na seção 3.1, pode-se dizer que as grandezas calculadas aproximaram bem o comportamento para sinais de pouca variação. Uma

evidência desse fato está no erro absoluto relacionado às grandezas a_y, *p* e *r*, que podem ser verificados na tabela 1. Isso é explicado pela decisão tomada para descrever a matriz *A* – a de que os sinais variariam de maneira lenta, o que nem sempre foi verdade.

Isso também pode ser notado nas figuras 4(a) e 4(b), referentes à fusão dos sensores: o erro absoluto calculado foi menor para ϕ, que teve um comportamento mais suave no decorrer do tempo. No entanto, esse efeito também pode ser relacionado ao fato de que o valor real do ângulo ϕ em si são menores do que para θ. O uso do erro relativo em vez do absoluto para essa comparação seria ideal, mas não pôde ser feito devido à existência frequente de valores nulos ou muito próximos a isso.

Outro fato a ser observado nos resultados da fusão de sensores com o filtro de Kalman é o de que o comportamento geral do sinal foi previsto corretamente na maioria das vezes. Ou seja, apesar de as amplitudes calculadas serem inferiores às reais, o sentido dos picos foi acertado.

REFERÊNCIAS

CARR, J.; BROWN, J. **Introduction to Biomedical Equipment Technology**. 4. ed [S.l]: Pearson, 2000.

EBERHART, R.; SHI, Y. **Comparing inertia weights and constrictionfactors in particle swarm optimization**. In:Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Com-putation. CEC00 (Cat. No.00TH8512). [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 84–88.

ELECTROCHEM. **World of Sensors**. Disponível em: <https://www.electrochem.org/world-of-sensors>. Acessado em: 5 de fevereiro de 2020.

EROR, N. ; COPPERSMITH, S. ; DEAN, P. ; MURRAY, R. ; PEERCY, P. ; ROGERS, C. ; SADOWAY,D. ; THOME, J. ; WAGNER, J. **Expanding the Vision on Sensor Materials**. [S.l.]: National AcademyPress, 1995.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. In:Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p.1942–1948 vol.4.

KIM, P. **Kalman filter for beginners with matlab examples**. In: . [S.l.]: A-JIN Publishing Company, 2010.

LAAMARI, Y.; CHAFAA, K.; ATHAMENA, B. **Particle swarm optimization of an extended kalman filter for speed and rotor flux estimation of aninduction motor drive**. Electrical Engineering, v. 97, n. 2, p. 129–138, 2015.

MACEDO, I. **Implementing the Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm in Python**. Disponível em: <https://medium.com/analytics-vidhya/implementing-particle-swarm-optimization-pso-algorithm-in-python-9efc2eb179a6>. Acessado em: 20 de julho de 2020.

OLIVEIRA W.; GONÇALVES, E. **Implementação em c: Filtro de kalman, fusão de sensores para determinação de Ângulos**. For Science, v. 5, n. 3, 2017.

TÖRN, A.; ŽILINSKAS, A. **Global optimization**. In:Lecture Notes inComputer Science. [S.l.: s.n.], 1989. v. 350, p. 1–2.

TRIPATHI, D. P.; JENA, U. R. **Cognitive and social information based PSO**. African Journals Online, v. 8, n. 3, p. 64–75, 2016.

WELCH, G.; BISHOP, G. **An introduction to the kalman filter**. In: .[S.l.]: University of North Carolina at Chapel Hill, 2001. p. 20.

WILSON, E. **Sociobiology: The new synthesis**. In: . [S.l.]: The Belknap Press of Harvard University Press, 1975. cap. 21, p. 442.

CAPÍTULO 2

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 20/02/2021

Laura Vieira Maia de Sousa
Universidade de Brasília - UnB
Brasília – DF
http://lattes.cnpq.br/6003946407076721

Paula Meyer Soares
Universidade de Brasília - UnB
Brasília- DF
http://lattes.cnpq.br/2980177609398812

RESUMO: A transição energética apresenta-se como solução urgente frente às mudanças climáticas globais. A descarbonização das matrizes energéticas das nações mundiais exige a modernização e aplicação de instrumentos regulatórios para a flexibilização de seus sistemas energéticos, afim de que possam alcançar metas de sustentabilidade energética. As iniciativas nacionais e internacionais de transição energética estão contidas no estudo. Desde os anos 2000 o Brasil vem adotando medidas de fomento e de expansão do uso de fontes de energia renováveis de modo a atender o compromisso firmado dos acordos internacionais de proteção ao meio ambiente e de convenções climáticas. O objetivo do estudo é apresentar uma visão ampliada da transição energética dentro do contexto nacional e internacional e principais desafios e oportunidades existentes nos dias atuais. A metodologia baseia-se em levantamento bibliográfico acerca das ações e políticas relacionadas à transição energética. Os resultados mostram o longo caminho a ser percorrido pelo setor energético brasileiro de modo a atender as exigências e metas de reduções de emissões de GEE.
PALAVRAS - CHAVE: descarbonização, transição energética, setor elétrico, fontes renováveis**.**

ABSTRACT: The energy transition presents itself as an urgent solution in the face of global climate changes. The decarbonisation of the energy matrixes of world nations requires the modernization and application of regulatory instruments to make their energy systems more flexible, in order to achieve energy sustainability goals. National and international energy transition initiatives are contained in the study. Since the 2000s, Brazil has been adopting measures to promote and expand the use of renewable energy sources in order to meet the commitment signed by international environmental protection agreements and climate conventions. The aim of the study is to present an expanded view of the energy transition within the national and international context and the main challenges and opportunities existing today. The methodology is based on a bibliographic survey about the actions and policies related to the energy transition. The results show the long road ahead for the Brazilian energy sector to meet the requirements and targets for GHG emission reductions.
KEYWORDS: decarbonisation, energy transition, electricity sector, renewable sources.

1 | INTRODUÇÃO

A energia pode ser considerada o componente necessário e principal de toda a sociedade moderna. A partir dela, são criados bens e serviços cujos quais todos puderam e poderão ser amparados, seja nos seus altos padrões de vida quanto no desenvolvimento econômico. O fato é que o principal denominador comum entre estes dois fatores é a capacidade de abastecimento e disponibilidade desta energia. Isso significa dizer que o fator limitante de uma sociedade atual é a sua capacidade de armazenar e gerar energia bem como o seu uso eficiente pode garantir a segurança de abastecimento e proteção do clima (HINRICHS et al, 2017),

O conceito de transição energética associa-se a mudanças na estrutura da matriz energética primária. Dito de outra forma, a transição energética consiste em um processo complexo que traz em seu bojo transformações na direção de uma economia de baixo carbono.

A emissão de um volume menor de poluentes na atmosfera requer o compromisso da adoção de medidas que incentivem o uso eficiente e racional dos recursos energéticos e que reduzam a participação de combustíveis mais intensivos em emissões de carbono na matriz energética.

A transição energética não é um processo linear e tampouco de médio e curto prazos. O alcance de metas ambientais menos nocivas ao meio ambiente preveem a substituição progressiva de fontes de energia. A velocidade pela qual essa substituição ocorrerá no longo prazo dependerá da capacidade de absorção e de ajuste tecnológico dos setores produtivos, de transporte e utilização de energéticos.

Os desafios enfrentados em um processo de transição energética são muitos e percorrem desde a capacidade dessa economia em absorver novas tecnologias de uso energético até a sincronização e coordenação nacional de políticas que facilitem a criação de ambientes de negócios favoráveis à inserção dessas tecnologias em um novo contexto industrial, econômico e ambiental. É necessária a construção de um aparato institucional que garanta e incentive estratégias de negócios na direção de uma economia mais conectada, digitalizada, eletrificada, automatizada.

Dentro desse contexto, o presente trabalho visa discutir a questão da transição energética no setor energético em um contexto atual sob um prisma mundial e nacional, apresentando os desafios e oportunidades ressaltando as ações direcionadas a esse processo até o presente momento.

O capitulo divide-se em quatro seções. A primeira seção discorre sobre a transição energética apresentando suas particularidades e complexidades no que diz respeito ao conceito em si. Serão abordados nessa seção a transição energética no mundo e no Brasil. A segunda seção trata sobre os desafios e oportunidades da transição energética com as ações e políticas implementadas. A terceira seção descreve o método utilizado para a

realização do estudo. A quarta seção aborda as discussões em curso na atualidade com os agentes arrolados no setor energético e que provavelmente comporão a agenda futura de transição energética do país. Por último temos as considerações finais.

1.1 A Transição Energética em Foco

A transição energética significa modificar as estruturas do setor energético global em busca de uma matriz energética de carbono zero até metade deste século (IRENA, 2018). A redução a níveis aceitáveis de emissões de poluentes originários de unidades produtoras de energia elétrica atividades industriais e redes de transporte depende de ações coordenadas e politicas mundiais de controle de emissão desses gases de efeito estufa que não o CO_2. Por outro lado, são necessárias medidas que diminuam a velocidade do desmatamento, da emissão de poluentes nos rios e mares de modo a arrefecer as previsões futuras de elevação da temperatura do planeta para os próximos anos.

O alcance de metas climáticas e ambientais exigem políticas mundiais e locais que fomentem o uso de tecnologias inteligentes de eficiência energética e instrumentos de mercado que orientem ao caminho da descarbonização (GONÇALVES et al., 2020). [1]

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a demanda energética mundial até 2024 poderá crescer a uma taxa anual de 2,1% e por isso a necessidade de desenvolvimento de tecnologias energéticas limpas e eficientes.

Todos os caminhos viáveis para uma economia de baixo carbono e de um líquido de emissões de CO_2 zero exigem um enorme incremento no papel da energia elétrica A manutenção da temperatura global abaixo dos 2º Celsius, requer uma profunda transformação no sistema global energético que é amplamente baseado em recursos de origem fóssil.

A transição energética vê na expansão do uso das fontes renováveis a solução para o alcance dessas metas climáticas e de produção a nível mundial.

De acordo com o REmap (*Renewable Energy Roadmaps*) as fontes renováveis podem contribuir, até 2050, em 2/3 da produção primária[2] total de energia do mundo. Ainda, segundo o relatório, haverá um aumento para 40% da eletricidade no consumo total de energia final até 2050 – atualmente este valor é de 20% (IRENA, 2018).

No entanto, para que esse cenário ocorra, as fontes de Energia Renovável Variável (ERV), solar e eólica, deverão mais do que triplicar frente aos valores que representam atualmente. Segundo IRENA (2018a), em 2015, as fontes renováveis representavam 24% e não renováveis – gás natural, óleo e carvão - 76% na geração de eletricidade, em TRWh/ano. Para que o cenário do REmap se torne uma realidade, as energias renováveis deverão representar, em 2050, 85% e as não renováveis cerca de 15%. A flexibilização das matrizes

1 A descarbonização tem implicações de remover ou retirar o excesso de carbono emitido ou gerado de uma determinada atividade produtiva.

2 A energia primária engloba a energia na forma de recursos naturais, tais como: madeira, carvão, petróleo, gás natural, urânio, ventos, recursos hídricos e energia solar. A conversão da energia primária produz a energia secundária tais como, eletricidade, vapor e gasolina.

energéticas mundiais deverá ocorrer, e as fontes eólicas e solares deverão representar a espinha dorsal do fornecimento de energia elétrica.

De certo modo, considerando as questões econômicas, a transição energética prevê que o sistema de energia seja capaz de gerenciar de forma confiável e econômica a variabilidade e a incerteza de demanda e oferta em todas as escalas de tempo relevantes (IEA, 2018).

A flexibilização do sistema de energia é necessária afim que as oscilações da demanda e da oferta ocorridas ao longo do dia e em diferentes períodos do ano sejam atendidas sem quaisquer prejuízos ambientais e climáticos.

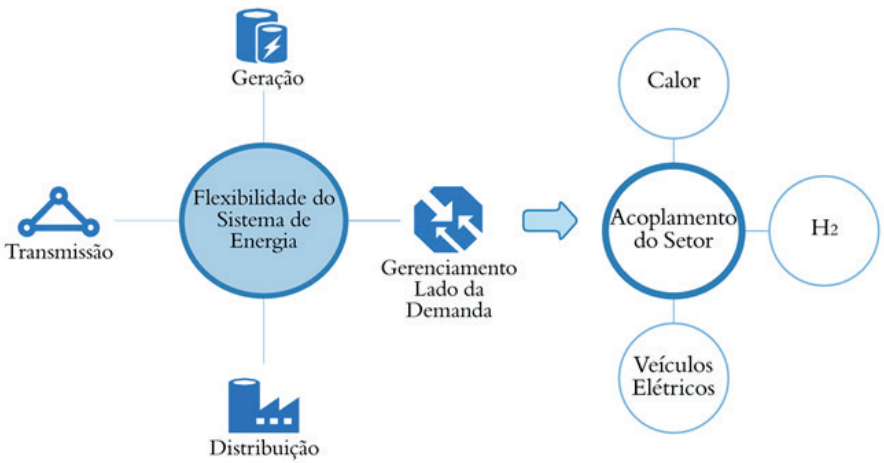


Figura 1 – Flexibilização do Sistema de Energia.

Fonte: Adaptado de IRENA (2018).

A transformação dos sistemas energéticos, baseados por fontes de origem fósseis, constitui em um enorme desafio. Isso se deve ao fato de que todo o sistema elétrico deverá desenvolver estratégias de equilíbrio de oferta e demanda, além de incluir outras fontes renováveis para serem exploradas, tanto em setores de geração, quanto de transmissão e distribuição (IRENA, 2018).

A descarbonização do setor energético e a redução das emissões de CO_2 constituem os objetivos que orientam a transição energética. O alcance desses objetivos requer uma sincronização de estratégias econômicas e técnicas que capacitem o desenvolvimento e uso de tecnologias de baixo carbono e que possibilitem a expansão do uso de fontes renováveis de energia.

De acordo com Plano Nacional de Energia 2050, a transição energética assenta-

se em 5 importantes eixos, de modo a alcançar metas de redução de emissão de CO_2 e incrementar o uso racional e eficiente dos recursos energéticos.

EIXOS TEMÁTICOS	DESCRIÇÃO
1. Eletrificação	Elevar a acessibilidade pelo uso da energia elétrica com base no uso de fontes renováveis com destaque para eólica e solar.
2. Maior flexibilidade do sistema de energia	Condicionar tecnicamente a flexibilização do sistema de energia de modo a adequar-se as oscilações da oferta e da demanda por energia.
3. Fontes Renováveis Convencionais	Incluir e incentivar a expansão e uso das fontes renováveis de energia com o intuito de reduzir as emissões de poluentes na atmosfera com destaque para os biocombustíveis e gás natural.
4. Hidrogênio Verde	Incentivar o uso de outras fontes alternativas de energia com baixos impactos ao meio ambiente. No setor de transporte, as baterias também poderão ter um papel relevante, mas terão que disputar mercado, no curto prazo, com os combustíveis e biocombustíveis e, no longo prazo, se alcançada a comercialidade, com o hidrogênio em veículos elétricos a pilha a combustível.
5. Promoção da inovação para atendimento de setores desafiadores	Incentivar e adotar políticas de inovação correlatas ao segmento de energia. Desenvolver processos de inovação em curso que apontem para uma nova revolução industrial (assim chamada indústria 4.0), envolvendo eletrificação, automação, conectividade e renovabilidade/descarbonização.

Quadro 1 – Eixos da Transição Energética.

Fonte: IRENA (2018a).

A consolidação desses eixos trará implicações de ordem técnica, econômica e ambiental. De acordo com os dados do IRENA (2020), estima-se uma redução em 70% das emissões de carbono na atmosfera. A inserção e incentivo do uso de fontes renováveis nas matrizes energéticas ocorrem em um cenário de redução dos custos de manutenção e de instalação dessas tecnologias. Ademais se prevê uma criação de sete milhões de novos empregos nessas áreas. No que tange ao suprimento energético estima-se um aumento na segurança energética e uma universalização do acesso à energia.

1.2 A Transição Energética no Mundo

A União Europeia iniciou esse movimento na direção da transição energética nos anos 70. A Alemanha foi um dos países pioneiros em adotar ações nessa direção.

Em meio as pressões oriundas dos movimentos ambientalistas, as ações de transição energética focaram especial atenção no combate às mudanças climáticas a não dependência da energia nuclear e garantia da segurança, competitividade e do crescimento energético. Esses movimentos ficaram conhecidos como *Energiewende* (CASTRO, 2018).

A motivação por detrás desse movimento estava relacionada à extinção ou diminuição da dependência energética em relação a outros países, como o gás natural da Rússia e carvão da Ucrânia, redução da carga de CO_2 e retirada da fonte nuclear da sua matriz

energética, democratização da geração de energia e o aumento da segurança energética. O movimento para abandonar a energia nuclear se intensificou após os acidentes de Chernobyl, em 1986, e de Fukushima, em 2011 (CASTRO, 2018).

Nos anos 80, foi desenvolvido o marco legal que visasse o melhor uso da energia com o uso eficiente das fontes energéticas disponíveis no respectivo país. A preocupação com o meio ambiente pressionado pelos movimentos ambientalistas a época, em 1991 foi implementada a Lei de Injeção da Energia, que obrigava as distribuidoras a receber energia elétrica gerada por fontes renováveis e ainda não subsidiada. Além disso, foi implementado o *Greed Feed-in Law* que estabeleceu o sistema de tarifas *feed-in* cujo principal objetivo é acelerar a implantação de tecnologias de energia renováveis (LANG; MATTHIAS, 2014).

Segundo o *Feed-in Tariffs,* empresas públicas pagam uma taxa garantida por unidade de energia elétrica produzida aos produtores de energia de fonte renovável. Essa taxa é fixada num montante, fornecendo uma taxa de retorno a estes produtores durante o período estabelecido no contrato. Isso faz com que as empresas atinjam economias de escala, diminuindo o custo da produção com o tempo (CORNFELD; CAROLINA, 2010). Alguns problemas foram tomando espaço, pois com a queda significativa no preço da energia e a abertura dos mercados de energia, as instalações de geração de energia por fontes renováveis não conseguiram se manter (IEA, 2013).

Em 2000, é assinado o *Renewable Energy Sources Act*, que estipula tarifas fixas na modalidade *feed-in* e mantém a prioridade das energias renováveis. Além disso, o país determina um plano para desativar todas as usinas nucleares até o ano de 2022. No entanto, em 2010, essa decisão foi cancelada e apenas se fixa em metas para emissão zero até 2050. Em 2014, as tarifas *feed-in* diminuem e leilões para empreendimentos fotovoltaicos são introduzidos. Estas tarifas, por sua vez, são extintas e apenas os leilões para energias renováveis se mantém.

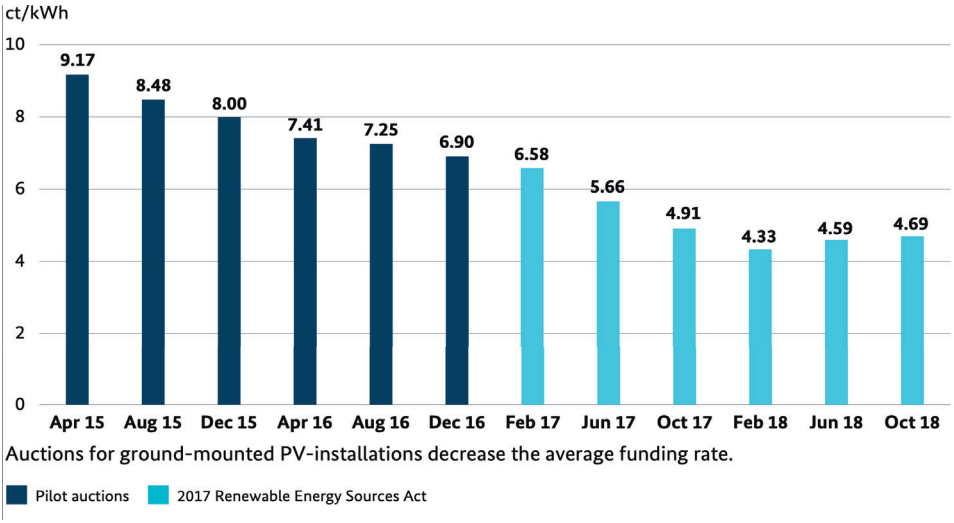


Gráfico 1. Financiamento médio concedido nos leilões para instalações fotovoltaicas montadas em solo.

Fonte: BMWi (2021).

No que tange ao sistema energético europeu, este é vulnerável a quaisquer modificações climáticas extremas dependendo amplamente de variadas fontes energéticas. Os usos de fontes renováveis aumentaram significativamente dado que entre os anos de 2008 a 2018, como apresenta o gráfico a seguir, o aumento da participação de energias renováveis na matriz de geração elétrica europeia foi de 11,9%, ou seja, de 16,6% em 2008, este valor saltou para 28,5%. Ainda assim, a participação de fontes não renováveis é maior. Dentre os valores de geração líquida de energia elétrica de fontes renováveis, a porção gerada a partir de fonte solar sofreu uma expansão de 0,3% em 2008 para 4,1% em 2018 em de 3,9% em 2008 para 11,3% em 2018 para fonte eólica.

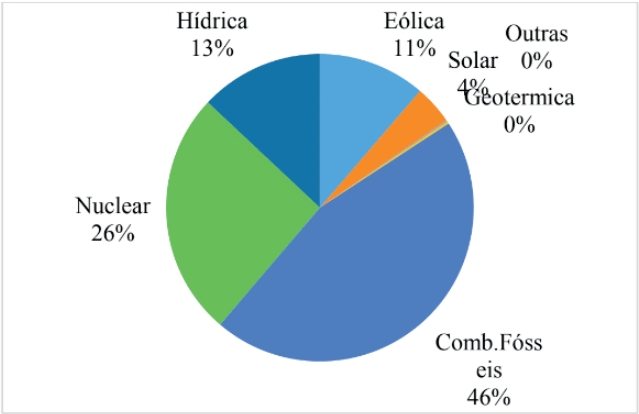


Gráfico 2. Geração líquida de eletricidade na UE-27 em 2018. (% em GWh).

Fonte: Eurostat (2018).

O desafio de alcançar a transição energética exige que os países atinjam quotas de 60% de suas matrizes baseadas em energias de fontes renováveis. Exemplos de nações que tornaram possível são Dinamarca e Irlanda. Estes dois países conseguiram uma integração de energia de fonte eólica em suas matrizes em 44% e 27%, respectivamente, com penetração instantânea máxima de 150% e 60% (RTE, 2018; EirGrid; SONI, 2018).

1.3 A Transição Energética no Brasil

A transição energética, como toda mudança, traz desafios e oportunidades. Tais desafios necessitam ser cristalizados e amparados em arcabouço institucional que potencializem esta transição.

Desde os anos 2000, o país vem incentivando o uso e a inserção de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira. De acordo com o Plano Decenal de Energia 2050, a expansão das fontes eólica, solar e biomassa tem sido expressiva frente as fontes oriundas de uso de combustíveis fósseis.

Até 2030 existe uma previsão e esforços voltados para a consolidação e expansão do uso das fontes renováveis. O gráfico 3 mostra a efetiva expansão planejada para as fontes PCH+Eólica+Biomassa+Solar com participação de 33% de participação na matriz energética brasileira e de 54% da fonte hídrica. Na soma as energias renováveis no Brasil somam 87% de participação conferindo ao Brasil um lugar de destaque como sendo um dos países que possuem uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo caso consigamos alcançar essa previsão de expansão contida no PDE 2030.

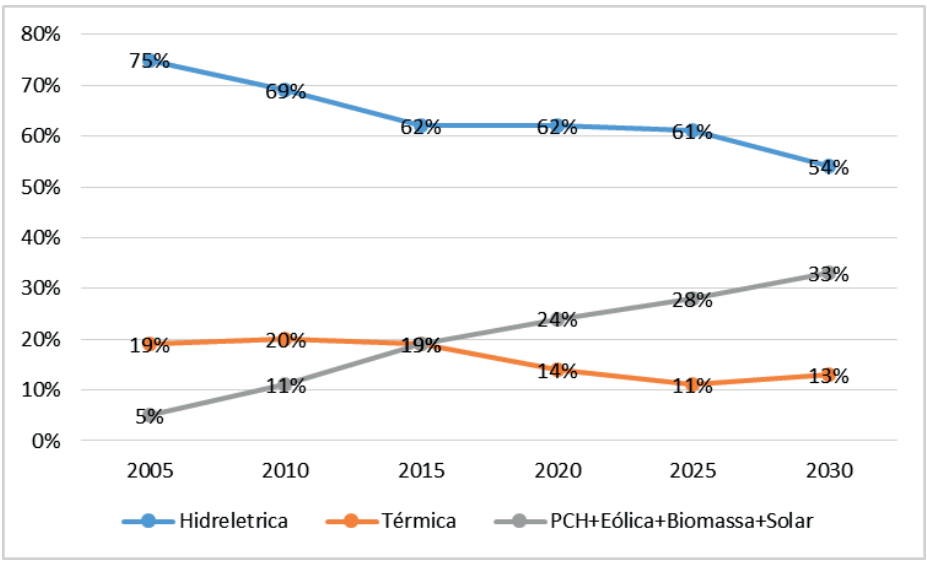


Gráfico 3 – Participação das fontes na capacidade instalada da geração centralizada (%).

Fonte: PDE 2030.

Além da perspectiva futura de incentivo ao uso de fontes renováveis projetadas para as próximas décadas o país vem estudando e implantando outras medidas que atendam a redução das emissões de gases de efeito estufa. Em 2015, o Brasil assinou juntamente com outras 147 nações o Acordo de Paris que previa a redução de 55% dessas emissões. Uma parte destas origina-se da atividade de geração de energia. O compromisso em buscar adequar a matriz de geração de energia a fontes menos poluentes está sacramentada pelo pais ao assinar esse acordo.

Observar-se-á que o Brasil vem desde os anos 2000 um movimento na direção de incluir em sua matriz energética fontes menos poluentes de modo que a meta de redução de emissões de poluentes seja alcançada. A perpetuação de emissões oriundas do uso de combustíveis fósseis é perversa à natureza e a saúde humana.

Apesar dos esforços, o próximo item traz algumas iniciativas que vem sendo adotadas pelo Brasil e que por hora estão institucionalizadas e que favorecem a transição energética.

2 | DESAFIOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

O avanço do Brasil na direção da transição energética requer a adequação do arcabouço institucional de modo a potencializar a transição energética. É preciso que se criem leis e mecanismos regulatórios que amenizem as barreiras não econômicas existentes na área de tecnologia. O reconhecimento dessas barreiras que impedem ou dificultam a

adesão tecnológica poupadora de energia. É crucial que esse o arcabouço garanta e amplie a amplie a conectividade, a automação, a descarbonização e a eletrificação em um país cuja diversidade tecnológica e de capital humano podem ser obstáculos para a transição energética (PDE, 2050).

Por outro lado é necessário que haja coerência e sinergia dessas políticas públicas em novos mercados. É importante o reconhecimento das particularidades inerentes em cada setor da economia e de energia de modo que as estratégias dos ambientes de negócios sejam desenhadas com o intuito de alcançar os objetivos de negócios em uma economia de baixo carbono e com maior grau de abertura e de competitividade (PDE, 2050).

DESAFIOS	RECOMENDAÇÕES (2020-2030)
Desenho de mercado e arcabouço regulatório e institucional não potencializam a transição energética	Promover a coerência de políticas públicas e desenhos de mercado Adequar arranjos institucionais, regulatórios que potencializem a transição energético.
Incertezas crescentes sobre condicionantes de evolução do setor	Desenvolver estratégias flexíveis para lidar com incertezas e baseadas nas vantagens competitivas do País e que promovam expansão tecnológica. Reforçar alianças e redes estratégicas internacionais para desenvolver maior flexibilidade nas escolhas estratégias associadas a transição energética.
Transição Energética tem dimensões múltiplas (desenvolvimento, educação, trabalho)	Articular políticas energéticas com políticas de CT&I e educação, desenvolvimento de novas capacitações e vantagens competitivas.

Quadro 2 – Mapa do Caminho da Transição Energéticas.

Fonte: Baseado no texto PDE (2050).

No contexto da transição energética é importante reforçar a ligação entre o planejamento energético nacional e o sistema de inovação e de políticas de CT&I de modo que haja a criação de um ambiente de negócios favorável à inovação em mercados abertos e competitivos. É importante que os players do sistema de inovação (NITs, Universidades, Centros de Pesquisa, Governo) adotem medidas coordenadas que fomentem iniciativas que promovam aumento da conectividade, da segurança cibernética, da automação no país. A criação de redes e sistemas de inovação favoráveis à transição energética colocaria o Brasil em uma posição de domínio no mercado de energias renováveis e de outras áreas intensas em capital intelectual. Para tanto, é necessário a criação de uma política nacional coordenada de incentivos e que direcionem os investimentos para essas áreas de energia de baixo carbono (PDE, 2050).

Além da coordenação nacional de uma política voltada a transição energética o país deve por meio de sua influência intelectual e *expertise* em diferentes áreas de energia estabelecer parcerias e convênios de desenvolvimento de novas tecnologias poupadoras

de energia, aprimoramento de equipamentos e partes de instalações com outros centros de excelência e de inovação. (PDE, 2050).

2.4 Políticas em Vigor Para o Setor de Energia

O país não possui por hora políticas do setor de energia para a transição energética, porém podemos afirmar que existem uma série de políticas que afetam e favorecem a transição energética. O quadro 3 mostra algumas iniciativas regulatórias que validam ações necessárias a realização de transição energética.

Lei no 10.438/2002 – Institui o PROINFA – Programa de incentivo às Fontes Alternativas	Criação de um programa que fomente a participação de fontes alternativas renováveis (pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e empreendimentos termelétricos a biomassa) na produção de energia elétrica no país.
Resolução no 482/2012 – ANEEL e Resolução no 687/2015 – ANEEL	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
Lei 12.187 de 2009- Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC	Estabelece o compromisso nacional voluntário de redução das emissões projetadas até 2020. O decreto 7.390/10, que regulamenta a PNMC, instituiu o PDE como o plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima do setor de energia.
Convenção-sobre a Mudança do Clima – UNFCCC) e a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) ao Acordo de Paris	Estabelece o compromisso do Brasil em reduzir as emissões líquidas totais de gases de efeito estufa em 37% em 2025 e em 43% até 2030. A NDC também enuncia o objetivo indicativo de atingirmos a neutralidade climática – ou seja, emissões líquidas nulas – em 2060.
Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio, Lei nº 13.576/2017	Prevê aumento da participação dos biocombustíveis na matriz de combustíveis do Brasil e cooperar para o atendimento aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris.
Lei do Gás em tramite na Câmara – PL no 4.476/2020	Dispõe sobre a modernização do setor com a formação de um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo, promovendo condições para a redução do seu preço e, com isso, contribuir para a retomada econômica do País.
MP 998/2021	Conhecida como a MP da modernização do setor elétrico traz elementos que ampliam a concorrência, reduza subsídios de fontes incentivadas e que geram distorções na formação de preços. Incentiva o mercado livre, permitindo a alocação adequada de custos e riscos, facilitando a incorporação de inovações tecnológicas no setor elétrico.
Programa de Incentivo Tecnológico e Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico – PAISS. (Lei nº 8.723/1993)	Programas de fomento e de incentivo ao desenvolvimento tecnológicos dos segmentos vinculados ao etanol com o fomento financeiro do Bando Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).
Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (Resolução CONAMA nº 18/1986; Lei nº 8.723/1993),	Prevê a promoção do desenvolvimento tecnológico nacional e a melhoria da qualidade dos combustíveis, além de programas de conscientização da população quanto à questão da poluição do ar e criar programas de inspeção e manutenção de veículos em uso.

Leilões de renováveis, Rota 2030 (Lei nº 13.755/2018).	Programa tem o objetivo de apoiar o desenvolvimento tecnológico, a inovação, a competitividade, a segurança veicular observando os quesitos de proteção ao meio ambiente voltados a frota de veículos no país (caminhões, carros, etc.).
Plano Nacional de Eficiência Energética, Lei 13.280/2016)	Engloba conjunto de ações que culminem na redução de energia necessária a atender as demandas da sociedade por serviços de energia.

Quadro 3 – Iniciativas regulatórias que tangencial a Transição Energética.

Fonte: Elaboração própria dos autores (2021).

As iniciativas elencadas acima visam, dentro de uma perspectiva futura, introduzir ações que diminuam as emissões de gases de efeito estufa com o incremento de melhorias no uso dos recursos energéticos no país. Os resultados obtidos com essas iniciativas serão obtidos dentro de um horizonte de 10 a 20 anos.

3 | METODOLOGIA

A presente pesquisa tem caráter descritivo e exploratório, pois busca descrever e analisar um determinado fenômeno de forma abrangente, sem se preocupar em responder uma questão específica. A pesquisa exploratória não parte de uma hipótese específica a ser confirmada, mas tem o propósito de proporcionar familiaridade com um problema (GIL, 2008).

Adotou-se pesquisa descritiva em que procura descrever uma dada realidade sem nela interferir. (SILVA, CERVO; BERVIAN, 2007).

A elaboração do estudo baseou-se em pesquisa bibliográfica que discorra sobre transição energética. Foi utilizado busca textual na Base de Dados da Universidade de Brasília e Google Acadêmico utilizando as palavras, “energy” ando r “transition” and or “renewable energy”.

Além da busca por palavras, foram utilizados relatórios de energia expedidos por organizações internacionais e nacionais como Empresa Planejamento Energético (EPE), Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Balanço energético Nacional (BEM), Plano Decenal de Energia 2050, IRENA, *International Renewable Energy Agency.*

Foram utilizadas para a realização do estudo as discussões ocorridas no âmbito do Ministério de Minas e de Energia acerca da transição energética.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A transição energética constitui em um processo complexo que abarca áreas diversas de uma economia. Seus efeitos são diversos no ambiente de negócios várias áreas da economia.

A redução da emissão de gases de efeito estufa a partir da remodelagem do setor

elétrico culminou na adoção de medidas e de políticas energéticas que colaboram com a transição energética. Os próximos itens discorrem de forma resumida as outras discussões em curso no Ministério da Energia no Brasil.

4.1 O Novo Papel das Empresas Distribuidoras de Energia

A transição energética prima pelo uso eficiente dos recursos energéticos assim como a substituição de fontes originarias de combustíveis fósseis pelas fontes renováveis.

O Brasil é um país de dimensões intercontinentais onde o despacho de energia é centralizado pelo Operador Nacional de Sistema (ONS) em um sistema Interligado Nacional (SIN) que cobre quase que a totalidade do território nacional. A parte não contemplada pela coordenação do ONS é atendida pelos sistemas isolados (SI). Na região Norte concentra-se maior parte da demanda por energia gerada por sistemas isolados, perfazendo um total de e totaliza 475 MWmed de carga em 2021. O atendimento dessa demanda por carga é majoritariamente baseada em termoelétricas a óleo diesel.

A dimensão intercontinental por um lado propicia elevados índices de perdas técnicas e não-técnicas na distribuição de energia, além da baixa qualidade do serviço prestado. O resultado da baixa densidade e alto nível de Perdas Não Técnicas é um elevado custo de distribuição. O custo médio do componente de distribuição da tarifa do consumidor residencial na região Norte é de 159 R$/MWh, enquanto a média nacional é de 126 R$/MWh.

Diante do exposto, é importante repensar o papel das distribuidoras no contexto atual. Remunerações oscilatórias dos serviços prestados pelas distribuidoras intensificarão a piora desses serviços a um contingente populacional que se encontra em situação desfavorável e de isolamento em relação aos demais brasileiros no país.

As distribuidoras devem exercer novos papeis na seara do setor elétrico. Concentrar o risco de mercado em um único segmento do mercado implicará em aportes futuros de recursos de modo a garantir a continuidade dos serviços prestados.

Sendo assim, as discussões em torno dos seguintes pontos já estão em curso:

- Introdução de tarifas por horário de consumo e implantação de medidores eletrônicos de modo a transferir as distribuidoras o valor justo pela prestação de serviço;
- Investimentos em tecnologias que promovam melhora na qualidade de rede e dos serviços ancilares prestados pelas distribuidoras que promovam a diminuição da instabilidade econômico-financeira;
- Modernização do segmento de distribuição frente às transformações que estão em curso no setor elétrico;

- Diversificação da remuneração de acordo com a qualidade de serviço prestado observando indicadores de continuidade e de frequência, por qualidade percebida por consumidores - *Net Promoter Score.*
- Melhora da governança de organizações setoriais – CCEE;
- Retomada do planejamento setorial – Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) e Empresa de Planejamento Energético (EPE);

Visto que o atual modelo de distribuição atual apresenta elos frágeis de grande vulnerabilidade no que tange a prestação de serviços as medidas supracitadas que estão em discussão tornariam futuramente esse segmento do setor elétrico menos exposto a oscilações técnicas e econômico financeiras. A institucionalização de um novo papel das distribuidoras no âmbito da comercialização garantiria uma redução das perdas técnicas e não-técnicas com a melhora da qualidade do serviço prestado.

4.2 A Separação Fio x Energia e Incorporação de Novas Tecnologias

Os Recursos Energéticos Distribuídos (RED`s) são recursos de geração e de armazenamento de energia a partir de diferentes tecnologias. Pode se considerar RED`s a Geração Distribuída (GD), armazenamento energético distribuído, mobilidade elétrica – veículos elétricos. A difusão destes recursos implica na inserção de novas tecnologias, tanto no lado da demanda, quanto da oferta, contribuindo para o uso de sistemas modernos nos serviços de distribuição elétrica em todas as áreas de demanda: urbanas, rurais e remotas. Estes recursos também servem como um suporte ao sistema centralizado, ou até mesmo como substituto, fomentando a não utilização de combustíveis de origem fóssil (GOUVÊA, 2019).

A modernização do setor elétrico já está em curso em vários países e, para que as distribuidoras consigam acompanhá-la, são necessários investimentos em tecnologias que permitam, por exemplo, o monitoramento em tempo real de ativos integrados à rede. *Smart grids* -redes inteligentes- têm sido utilizadas em vários países onde modernização do setor elétrico esteve presente.

Estas tecnologias disruptivas têm encaminhado o SEB para uma mudança de paradigmas significativa. Todavia, é preciso viabilizar a participação dos consumidores nestas mudanças, e este movimento será dado a partir de estudos dos agentes reguladores para um novo modelo regulatório.

No entanto, a estrutura tarifária atual não comporta as inovações tecnológicas que tendem a penetrar o SEB. O fato dos custos do sistema serem fixos e não variarem com o consumo acaba por inviabilizar e defasar a estrutura hoje utilizada. Este cenário é dado pelo fato de que o consumidor, ao escolher gerar sua energia ou tomar decisões que visem a eficiência de seu consumo, impacta os outros consumidores; a não promoção de incentivos às distribuidoras para utilizar mecanismos de eficiência energética.

A estrutura tarifária deve estimular e incentivar a diminuição de ociosidade na rede e isso só será possível a partir de uma estrutura tarifária flexível e descentralizada. De qualquer forma, é necessário que haja políticas de conscientização dos consumidores para que estes entendam e sejam capazes de reagir aos sinais econômicos, tornando esta mudança eficaz.

A ANEEL, e os agentes que fazem parte do SEB, devem se organizar para desenvolver mecanismos tarifários que possam direcionar as distribuidoras e consumidores para um ambiente que promova a gestão de energia sustentável e eficiência econômica, resultando na modicidade tarifária e alavancando o SEB para as futuras inovações tecnológicas.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição energética se apresenta como uma oportunidade de desenvolvimento tecnológico e avanço econômico para países como o Brasil. A questão-chave é como esses países irão explorar estas oportunidades de inovação industrial e de tecnologias verdes.

Um dos principais desafios atuais das nações mundiais é conseguir equilibrar seu fornecimento energético juntamente à sua demanda. Além disso, garantir a sua segurança energética, atendendo a requisitos de eficiência energética. Como definição mais completa, a flexibilidade energética está diretamente relacionada à capacidade de gerenciamento de demanda e fornecimento energético. É importante saber que crises energéticas podem e, provavelmente, irão acontecer. Os preços elevados do petróleo na década de 70, bem como suas crises - invasão do Iraque ao Kuwait em 1990 - impulsionaram sociedades a adotarem medidas de eficiência nos usos de energia, significando a diminuição do uso deste recurso de origem fóssil. Essas medidas se refletiram, por exemplo, na construção de carros 62% mais eficientes.

Diante do exposto, o caminho a ser percorrido na direção da transição energética exige o aprimoramento dos marcos regulatórios que possibilitem a flexibilização energética com a expansão do uso de recursos energéticos renováveis bem como a adoção de políticas públicas que incentivem a inovação, aumento da conectividade, automação e uso de tecnologias verdes.

A descentralização e a modernização do setor de energia são cruciais por meio da reestruturação tarifária e uma nova relação entre os serviços de distribuição e geração de energia.

REFERÊNCIAS

Auswärtiges Amt. **Die Deutsche Energiewende. Energiewende: Umschalten auf Zukunft**. Berlin, 2019.

ABRADEE, Associação Brasileira de Distribuição de Energia, **Comparação Internacional de Tarifas de energia Elétrica,** 2018.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética **Plano Nacional de Energia 2050** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética **Plano Nacional de Eficiência Energética** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020

BRASIL, Operador Nacional do Sistema, **Plano Anual da Operação Energética dos sistemas Isolados para 2021,** 2020.

CASTRO, Léo Metello. **Análise da política energética na Alemanha do século XIX ao XXI.** 2018.

CORNFELD, J; WERNER, C. **"Feed-in Tariffs."**. Environmental and Energy Study Institute (2010).

GOUVÊA, A.R. **Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil**. 2019.

GONÇALVES, D.N.S.; GOES, G. V.; D'AGOSTO, M. A. **Transição Energética no Brasil: Um Cenário Compatível com o Acordo de Paris para o Setor de Transportes até 2050**. Março, 2020.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; DOS REIS, Lineu B. **Energia e meio ambiente**. Cengage Learning Editores, 2017.

IEA (2019). **Renewables 2019**. Paris. Disponível em: < https://www.iea.org/reports/renewables-2019> Acessado em: fevereiro de 2021.

IEA (2013). **"Energy Policies of IEA Countries: Germany.".** Germany.

INSTITUTO ACENDE BRASIL, **Evolução das Tarifas de Energia Elétrica e a Formulação de Políticas Públicas,** White Paper 22, São Paulo, 22, 2020, 28.p

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Power system flexibility for the energy transition: Part 1, Overview for policy makers**. 2018.

IRENA (2018a), **Global Energy Transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi**. Disponível em: <http://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to- 2050IRENA (2018) Data and Statistics>. Acessado em: fevereiro de 2021.

LANG, M.; LANG, A. **"Overview Renewable Energy Sources Act."** German Energy Blog (2017).

RAUSCHMAYER, H. **Contribui**ções da Experiência Alemã para a Regulamentação da Geração Distribuída no Brasil. *Deutsch-Brasilianische Industrie- und Handelskammer,* 2018. Disponível em: < https://www.solarize.com.br>. Acessado em: fevereiro de 2021.

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO E GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA UFAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE)

Data de aceite: 01/05/2021

Pedro Henrique Melo Costa

Thiago Melo de Lima

Antonio Carlos Alves de Farias

Rennard de Oliveira Brito

RESUMO: O Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC – Universidade Federal do Acre é resultado de uma iniciativa da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, através da Chamada de Projetos de EE Prioritário e P&D Estratégico nº 01/2016 – "Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", a qual estimulava as distribuidoras de energia elétricas brasileiras investissem os recursos provenientes do PEE – Programa Nacional de Eficiência Energética, em projetos que tivessem como beneficiárias as instituições públicas de ensino superior que alinhassem as eficientizações energéticas com ações de pesquisa e desenvolvimento com o intuito de selecionar projetos pilotos e demonstrativos em que suas execuções fornecessem subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica em unidades consumidoras da administração pública. Nesse interim, a Energisa Acre (na época Eletroacre) com a parceria do CEEAC – Centro de Excelência em Energia do Acre concebeu o Projeto para atender à UFAC, maior e mais importante instituição superior de ensino do estado, sendo aprovado pela ANEEL. Com um investimento total de R$ 2.171.205,50 (sendo que as ações de P&D totalizam R$ 1.064.668,00 e as de EE R$ 1.106.537,50) o Projeto está em execução, tendo seu encerramento previsto para fevereiro de 2020, quando será finalizada a substituição das 14.255 lâmpadas do campus Rio Branco da UFAC, por lâmpadas de LED, mais modernas e eficientes energeticamente, além da ligação dos 496 painéis solares fotovoltaicos (sendo 264 no telhado e 232 no solo) à rede de energia elétrica, o que representa uma geração de 181,04 kWp de energia, sendo até o momento a maior usina solar fotovoltaica instalada em uma instituição pública do estado, trazendo redução de consumo de energia da universidade.

PALAVRAS - CHAVE: Energia Solar, Eficiência Energética, Pesquisa e Desenvolvimento.

ENERGY EFFICIENCY, RESEARCH AND DEVELOPMENT AND PHOTOVOLTAIC GENERATION AT UFAC (FEDERAL UNIVERSITY OF ACRE)

ABSTRACT: The Energy Efficiency and Rational Use of Electricity Project at UFAC - Federal University of Acre is the result of an initiative by ANEEL - National Electric Energy Agency, through the Call for Priority EE Projects and Strategic R&D nº 01/2016 - "Efficiency Energy and Minigeneration in Public Institutions of Higher Education ", which encouraged Brazilian electric energy distributors to invest the resources from the PEE - National Energy Efficiency Program, in projects that benefited public higher education

institutions that aligned energy efficiency with research and development actions in order to select pilot and demonstration projects in which their execution would provide important subsidies for the formulation of public policies to combat the waste of electricity in public administration consumer units. In the meantime, Energisa Acre (at the time Eletroacre) in partnership with CEEAC - Center for Excellence in Energy in Acre conceived the Project to serve UFAC, the largest and most important higher education institution in the state, being approved by ANEEL. With a total investment of R $ 2,171,205.50 (with R&D actions totaling R $ 1,064,668.00 and EE R $ 1,106,537.50), the Project is in progress, and its closure is scheduled for February 2020, when the replacement of 14,255 lamps on the Rio Branco campus of UFAC will be completed by LED lamps, which are more modern and energy efficient, in addition to the connection of 496 photovoltaic solar panels (264 on the roof and 232 on the ground) to the grid. of electricity, which represents a generation of 181.04 kWp of energy, being the largest solar photovoltaic plant installed in a public institution in the state so far, reducing the university's energy consumption.
KEYWORDS: Solar Energy, Energy Efficiency, Research and Development.

1 | INTRODUÇÃO

A ANEEL, por meio da CHAMADA Nº. 001/2016 PROJETO PRIORITÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTRATÉGICO DE P&D: “EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MINIGERAÇÃO EM INSTITUIÇÕES PÚBLICAS DE EDUCAÇÃO SUPERIOR” buscou a implementação de projetos que possibilitassem a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, e que incentivassem a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de educação, a implantação de minigeração de energia elétrica nas Instituições Públicas de Educação Superior, a redução nas contas de energia elétrica dessas instituições, assim como uma nova forma de gestão energética, por meio de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outras ações de capacitação profissional, além de buscar criar uma cultura de eficiência energética na formação de futuros profissionais, tendo em vista que tal cultura é de grande relevância para a sociedade como um todo.

Diante do cenário instigado pela ANEEL por meio da Chamada nº 001/2016, a Energisa Acre (na época Eletrocre) em parceria com a CEEAC propôs o projeto para atender a UFAC, tendo como beneficiário o campus Rio Branco, trabalhando em duas frentes, a saber:

- PEE, cujo objetivo geral é a reduzir o consumo de energia elétrica da unidade consumidora em questão;
- P&D, cujo objetivo geral é disseminar a cultura de eficiência energética no âmbito acadêmico, através do aumento do conhecimento do tema por meio da monitoração do consumo próprio, estudos dos hábitos regionais de consumo, estudos e monitoração da rede elétrica interna, pesquisas de potenciais para geração por fontes alternativas, fomento a inovação e desenvolvimento tecno-

lógico de automação.

2 | INICIATIVAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O programa de eficiência energética regulado pela ANEEL (PEE) tem como objetivo principal promover o uso eficiente e racional de energia elétrica em todos os setores da economia, por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Busca-se, em última instância, a transformação do mercado de energia elétrica, estimulando a demanda por equipamentos energeticamente eficientes e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica.

Diante desse cenário é que foram pautadas todas as iniciativas de eficiência energética do Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC, que abrangem a eficientização do sistema de iluminação da UFAC Campus Rio Branco e a implantação de geração distribuída, visando a redução de consumo de energia da referida unidade consumidora.

2.1 Objetivo

O objetivo do projeto aprovado é a redução de consumo de energia na unidade consumidora da UFAC, Campus Rio Branco, possibilitada pelo *retrofit* dos sistemas de iluminação e a implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede, além de ações de fomento aos conceitos de eficiência energética voltadas aos usuários do campus (alunos, professores, servidores e sociedade em geral) quanto a importância do uso racional da energia elétrica.

2.2 Retrofit dos sistemas de iluminação

O sistema de iluminação do campus Rio Branco da UFAC abrangia diversos tipos de lâmpadas, das mais variadas tecnologias e condições de utilização, que estão sendo substituídas por 14.255 lâmpadas/luminárias do tipo LED com potências equivalentes, mais modernas e com menor consumo de energia elétrica, além de uma menor necessidade de investimento em sua manutenção, tendo em vista que essa tipologia não necessita da utilização de reatores e entrega um maior conforto visual aos usuários, com fluxo luminoso equivalente e menor consumo de energia, se comparadas com tecnologias antecessoras.

Nos ambientes internos, caracterizados como prédios administrativos e prédios acadêmicos, eram utilizadas lâmpadas do tipo fluorescentes compactas e tubulares, com potências que variavam de 20 W a 32 W e reatores de 3 W. Já nos ambientes externos, tais como áreas esportivas, as lâmpadas mais utilizadas eram as de alta pressão (vapor de sódio, vapor de mercúrio e vapores metálicos) variando 50 W chegando até 400 W, acrescidas ainda as perdas de seus respectivos reatores.

2.3 Implantação da Usina Solar Fotovoltaica

O projeto é uma iniciativa importantíssima no sentido de que se trata da maior planta de geração de energia elétrica a partir da energia solar a ser implantada em instituições públicas no estado do Acre, o que dá um caráter de boa aplicabilidade em termos de se avaliar o potencial impacto dessa fonte renovável na região, questão que é reforçada a partir da previsão de competências locais por meio da capacitação dos grupos de pesquisadores e alunos, tendo como base a experiência prática de aplicação da usina fotovoltaica no ambiente da universidade.

Ao todo, foram instalados 496 módulos fotovoltaicos, divididos em 3 plantas, sendo uma na cobertura do edifício que abriga o CEEAC, com 264 módulos e duas no solo, que juntas somam 232 módulos, os três geradores juntos possuem uma potência instalada de 181,04 kWp.

A divisão da usina em 3 plantas deu-se por conta de critérios educacionais, tendo em vista que as plantas no solo facilitam o acesso de alunos e professores aos módulos fotovoltaicos, potencializando o processo de ensino-aprendizagem, também objeto do Projeto.

A Figura 1 apresenta a localização do gerador localizado nas proximidades da biblioteca central que, além de sua função natural de produção de energia elétrica (7.352 kWh/mês), é considerado um marco na instalação de geradores fotovoltaicos conectados à rede dentro do campus universitário.



Figura 1: Gerador de 60,59 kWp, localizado nas intermediações da biblioteca central da universidade.

A Figura 2 apresenta os dois geradores localizados no CEEAC que quando conectados à rede compensarão o montante de 14714 kWh/mês.



Figura 2: Geradores de 24,09 kWp (solo) e 96,36 kWp (cobertura).

Sendo o CEEAC um centro de pesquisa que está inserido no contexto da universidade, e que tem como principais objetivos a capacitação de recursos humanos e a atração de pesquisadores relacionados as áreas de geração, transmissão, distribuição e meio ambiente, segregou-se a geração de modo que em um futuro próximo, profissionais sejam capacitados para o mercado emergente da energia solar. O laboratório externo do CEEAC (LE – CEEAC), como foi intitulado, poderá ser usado como ferramenta de testes de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos (monocristalino, policristalino, silício amorfo, etc), além de permitir experimentos quanto ao posicionamento dos módulos em relação ao norte geográfico, para produção de estudos relacionados as perdas por inclinação (Lima, 2019).



Figura 3: LE-CEEAC (24,09 kWp).

Cada gerador possui um sistema de monitoramento detalhado, onde além dos dados de geração (tensão, corrente, potência, etc.) é possível obter dados de temperatura do módulo de referência, temperatura ambiente, intensidade dos ventos sobre o gerador e irradiação no plano inclinado. Através desses dados medidos é possível produzir relatórios e realizar pesquisas de cunho científico e tecnológico caracterizando o potencial de geração da região.

2.4 Ações de Treinamento e Capacitação

Buscando fomentar entre os usuários do campus Rio Branco da UFAC a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica, inclusive como uma forma de potencializar os resultados do projeto foram realizadas ações de treinamento e capacitação em formato de minicursos, cujo público alvo são os funcionários de todas as unidades abrangidas pelo Projeto de eficiência energética, com a carga horária total de 9 (nove) horas de minicurso, ministrados por engenheiros da Energisa Acre e do CEEAC.

2.5 Investimento

As ações previstas totalizam R$ 1.106.537,50 (um milhão, cento e seis mil, quinhentos e trinta e sete reais e cinquenta centavos), contemplando a aquisição de materiais e equipamentos, assim como pelo pagamento dos serviços necessários para suas respectivas instalações.

2.6 Resultados Esperados

A expectativa da economia de energia foi calculada a partir da diferença entre a energia consumida pelo sistema atual, através da realização do diagnóstico energético, e

da projeção de redução no consumo de energia após as ações de eficiência energética. Sendo a energia consumida o simples produto entre a potência instalada e o ciclo de funcionamento dos equipamentos.

Da mesma forma, a redução de demanda na ponta foi calculada a partir da diferença entre a demanda média na ponta do sistema atual e a demanda média na ponta do sistema após a intervenção. Este parâmetro é determinado a partir do produto entre a potência instalada e o fator de coincidência na ponta (fator referente a potência demandada pelo equipamento no horário de ponta).

ILUMINAÇÃO - RESULTADOS ESPERADOS - EX ANTE					
					TOTAL
21	Redução de demanda na ponta		kW	RDP_i	116,61
22	**Custo evitado de demanda (CED) =**	**390,85**	%	RDP_i%	41,41%
23	Energia economizada		MWh/ano	EE_i	313,79
24	**Custo da energia evitada (CEE) =**	**265,34**	%	EE_i%	41,46%
	Benefício anualizado iluminação - Ex ante		R$	B_{ILUM}	128.836,83

Tabela 1 – Redução de demanda na ponta e energia economizada (iluminação).

SISTEMA FOTOVOLTAICO - RESULTADOS ESPERADOS				
				TOTAL
Redução de demanda na ponta		kW	*RDP*	746,25
Custo evitado de demanda (CED) =	**390,85**			
Energia economizada		MWh/ano	*EE*	112,32
Custo da energia evitada (CEE) =	**265,34**			
Benefício anualizado da geraçaõ incentivada - Ex ante		R$	B_{FONTES}	23.967,19

Tabela 2 – Redução de demanda na ponta e energia economizada (sistema fotovoltaico).

CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO - EX ANTE							
Uso final	EE Energia economizada MWh/ano	RDP Redução de demanda na ponta kW	$CA_{T\,PEE}$ Custo anualizado PEE		BA_T Benefício anualizado total	RCB_{PEE} Por uso final PEE	RCB_{PEE}
Iluminação	313,79	116,61	R$	57.075,37	R$ 128.836,83	0,44	
Condicionamento ambiental	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	
Sistemas motrizes	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	
Sistemas de refrigeração	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	
Aquecimento solar de água	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	0,75
Equipamentos hospitalares	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	
Outros	0,00	0,00	R$	-	R$ -	0,00	
Fontes Incentivadas	112,32	746,25	R$	57.311,13	R$ 23.967,19	2,39	
Total	**426,11**	**862,86**	**R$**	**114.386,49**	**R$ 152.804,01**	**0,75**	

Tabela 3 – Relação custo-benefício.

3 | INICIATIVAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

O programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor de energia elétrica tem o objetivo de alocar adequadamente recursos humanos e financeiros em projetos que demonstrem a originalidade, aplicabilidade, relevância e a viabilidade econômica de produtos e serviços, nos processos e usos finais de energia. Busca-se promover a cultura da inovação, estimulando a pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico brasileiro, criando novos equipamentos e aprimorando a prestação de serviços que contribuam para a segurança do fornecimento de energia elétrica, a modicidade tarifária, a diminuição do impacto ambiental do setor e da dependência tecnológica do país.

Diante desse cenário é que foram pautadas todas as iniciativas de pesquisa e desenvolvimento do Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC, que abrangem implantar no campus um projeto piloto de gestão e gerenciamento de energia e um centro de monitoramento em tempo real do consumo próprio e grandezas elétricas, desenvolver softwares e equipamentos de baixo custo para automação dos sistemas de iluminação e refrigeração, além de avaliar os resultados da experiência da Usina Solar Fotovoltaica implantada no projeto de Eficiência Energética e analisar os Impactos da Geração Própria no Sistema de Distribuição.

3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC no que diz respeito às ações de pesquisa e desenvolvimento é disseminar a cultura de eficiência energética no âmbito acadêmico, através do aumento do conhecimento do tema por meio da monitoração do consumo próprio, estudos dos hábitos regionais de consumo, estudos e monitoração da rede elétrica interna, pesquisas de potenciais para geração por fontes alternativas, fomento a inovação e desenvolvimento tecnológico de automação.

3.2 Objetivos Específicos

As iniciativas de pesquisa e desenvolvimento do Projeto contemplam:

- Implantar projeto piloto de gestão e gerenciamento de energia, com a criação de grupo interdisciplinar de gestão energética;
- Avaliar os resultados da experiência da usina solar fotovoltaica implantada no projeto de eficiência energética;
- Estudar os impactos da geração própria no sistema de distribuição;
- Implantar centro de monitoração em tempo real do consumo próprio e grandezas elétricas;

- Desenvolver softwares e equipamentos de baixo custo para automação dos sistemas de iluminação e refrigeração;
- Implantar rede de coleta de dados meteorológicos e solarimétricos e reunir as informações em banco de dados para suporte à pesquisas futuras;
- Fomentar na comunidade acadêmica publicações técnico-científicas para divulgação das ações e desenvolvimentos realizados no âmbito do Projeto.

3.3 Protótipo de automação

Dentro do Projeto foi previsto o desenvolvimento de um protótipo de automação capaz de reduzir o desperdício de energia elétrica em um local pré-estabelecido e proporcionar eficiência energética. Neste aspecto, centrais de automação comerciais foram pesquisadas a fim de que fosse desenvolvido algo semelhante, utilizando-se de tecnologia de baixo custo e o envolvimento dos alunos de graduação de engenharia elétrica da universidade (Bezerra, 2019).

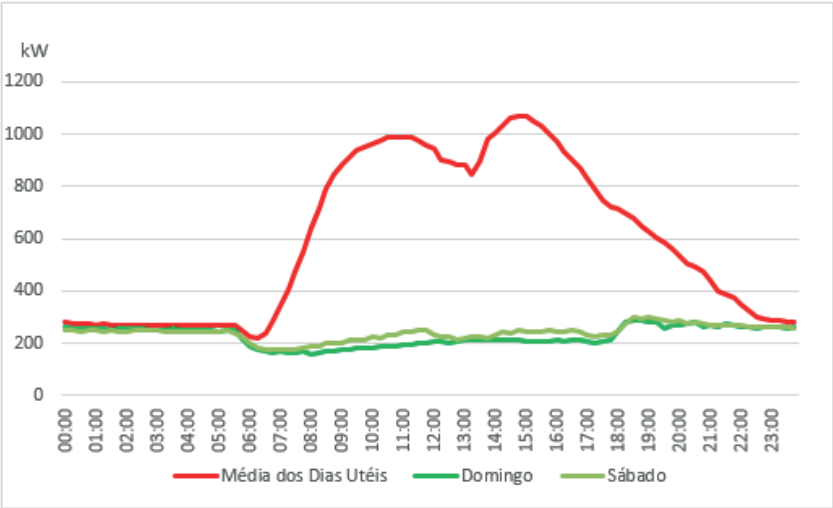


Figura 4:Curva de carga típica da universidade para um período de sete dias.

A Figura 4 apresenta a curva de carga típica para o campus Rio Branco. As curvas para os dias úteis e final de semana foram plotadas através dos pontos obtidos na tabulação de dados da memória de massa obtida junto a administração da universidade.

A curva representa toda a potência ativa consumida durante as horas do dia. Através disto é possível inferir que, o consumo inicia as 7h, e se entende até as 23h, tendo os seus principais picos de consumo entre 9h e 11h, e 14h as 16h. Um ponto a se considerar nesta curva, é que, no período de intervalo entre os turnos, não existe um decréscimo abrupto da

energia consumida. No intervalor entre 12h e 14h a redução é de 200 kW, o que equivale somente à 18,2% da potência no seu maior pico (1.100 kW).

Para isto, as programações implementadas no protótipo visam principalmente as partes da curva de consumo, onde em teoria, deveria haver um decrescimento. O protótipo apresentado na Figura 5 conta com um microcontrolador com capacidade de processamento suficiente para gerenciar dados adquiridos pelos sensores (corrente, tensão e de presença do tipo PI) e enviar dados aos circuitos de iluminação e refrigeração que os acione ou desligue.

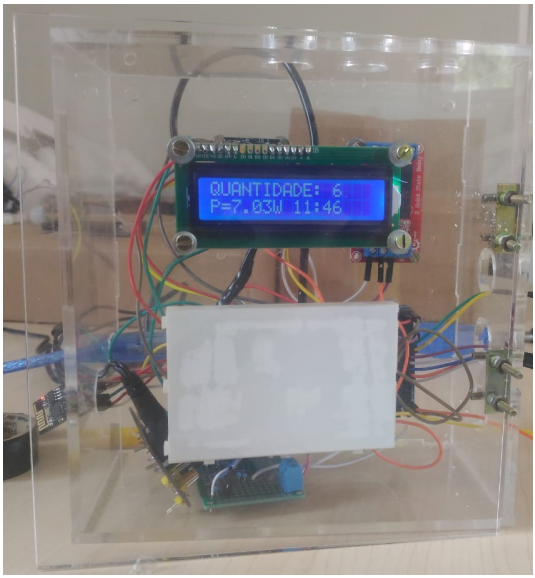


Figura 5: Protótipo de automação produzido.

O protótipo além do display, que mostra dados de potência ativa, envia dados para um servidor da internet que permite o monitoramento em tempo real do consumo, além de revelar características sobre o uso do ambiente, formando um banco de dados importante que pode subsidiar pesquisas futuras. Em fase experimental, o protótipo foi instalado em uma sala de aula (Figura 6) para que fossem feitas avaliações iniciais.



Figura 6: Instalação do protótipo em sala aula. Em laranja os sensores de presença do tipo PI, em amarelo o protótipo de automação.

A depender dos resultados positivos da implementação do protótipo, alunos do curso de engenharia elétrica pretendem dar continuidade ao projeto através da aplicação de funções mais complexas, como o controle de luminosidade em áreas externas (corredores) e a aplicação em setores da administração.

3.4 Estações solarimétricas

Buscando a introdução da pesquisa de cunho científico aliada aos objetivos do projeto, foram previstas as instalações de 3 estações solarimétricas em diferentes localidades do Acre (Cruzeiro do Sul, Rio Branco e Brasiléia), e especificamente dentro do território da universidade. As estações em sua forma operativa oferecem subsídios para a estimação do potencial de geração de energia fotovoltaica dos campi. As estações são padronizadas (Figura 7) e foram projetadas para operarem de maneira autônoma tanto pelo provimento de energia elétrica quando para o envio de dados.

As estações implantadas atendem todos os requisitos previstos nas notas emitidas pela ANEEL (2016) e EPE (2017), quanto as especificações técnicas mínimas recomendas para a validação de estudos produzidos a partir dos dados coletados. Os sensores presentes nas estações são: piranômetro, anemômetro, pluviômetro, barômetro e termo-higrômetro, através destes sensores é possível efetuar medidas de grandezas como radiação, direção e intensidade dos ventos, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar.



Figura 7: Estações solarimétricas instaladas. Rio Branco (a), Brasiléia (b) e Cruzeiro do Sul (c).

3.5 Resultados esperados

O Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC espera entregar não só para a comunidade acadêmica da própria universidade, mas para a sociedade acreana, os seguintes resultados:

- Instituição de forma permanente do grupo de gestão energética com a participação efetiva de representantes das áreas técnicas (engenharias elétrica, civil e arquitetura), áreas de meio ambiente, administração do campus (prefeitura, reitoria, planejamento) sob a coordenação do CEEAC;
- Pesquisa comportamental dos hábitos regionais de consumo e de pequenas ações (baixo custo) que podem gerar grandes resultados;
- Publicação com os resultados da experiência de implantação da 1ª usina solar fotovoltaica da universidade;
- Artigos técnicos e trabalhos de conclusão de curso sobre os impactos da geração distribuída no sistema de distribuição;
- Laboratório com aquisição de dados remotos de medições de grandezas elétricas da rede de distribuição, geração distribuída e das cargas;
- Relatório técnico e trabalhos de conclusão de curso sobre a qualidade de energia;
- Relatório técnico de acompanhamento da evolução das perdas técnicas, carregamentos dos circuitos e transformadores, perfil de tensão dos alimentadores

- Capacitação do laboratório de eletrônica e informática para desenvolvimento de softwares e equipamentos de baixo custo para automação dos sistemas de iluminação e refrigeração;
- Sistema informatizado para suporte a pesquisa com base de dados meteorológicos e solarimétricos das estações instaladas nas unidades da UFAC no interior do estado;
- Capacitação de alunos e professores;
- Publicações técnico-científicas para divulgação das ações e desenvolvimentos realizados no âmbito do projeto.

3.6 Investimento

Os custos referentes às ações de P&D no Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC totalizam R$ 1.270.668,00 (hum milhão, sessenta e quatro mil, seiscentos e sessenta e oito reais).

4 | CONCLUSÃO

Assim como a ANEEL na época da avaliação, percebeu-se no Projeto de Eficiência Energética e Uso Racional de Energia Elétrica na UFAC como altamente promissor tendo em vista que a introdução da geração distribuída no campus de Rio Branco da Universidade Federal do Acre proporcionará, além da redução da fatura de energia, uma experiência em ações de eficiência energética e GD, com envolvimento dos funcionários, professores e alunos, que poderá ser replicada em outras instituições do estado, carente em ações nesse sentido.

O projeto é altamente inovador, tendo em vista que a instalação de um sistema de minigeração fotovoltaica no campus da universidade, acoplado com ações de eficiência energética, e ainda provendo insumos técnicos para atividade de P&D.

A aplicabilidade da tecnologia no campus da universidade é importante para a região, que pode servir como referência para novos projetos, considerando as características regionais da Amazônia.

Quanto à necessidade de apoio do PEE, este é imprescindível para a UFAC, que embora conte com corpo técnico especializado e apto, os investimentos necessários são vultosos para serem assumidos pela universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à Jessica, minha inspiradora companheira e aos meus pais, pelo apoio incondicional. Quero aproveitar para reconhecer o incentivo dado pela professora Leonarda Cajuaz, que durante a disciplina que lecionou na especialização em eficiência energética na Universidade de Fortaleza – Unifor me instigou a elaborar

esse artigo e submetê-lo para avaliação da comissão julgadora do VIII CBENS. Agradeço ainda aos diretores da Energisa Acre, a todos os membros da coordenação de eficiência energética do Grupo Energisa, assim como aos corpos técnicos da UFAC e do CEEAC.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional De Energia Elétrica. Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE, Versão revisada e aprovada pela Resolução Normativa nº 830, de 23/10/2018.

ANEEL – Agência Nacional De Energia Elétrica. Nota Técnica nº 603/2016-SCG/ANEEL de 25 de agosto de 2016. Referente à emissão de Resolução Normativa com objetivo de aprimorar os requisitos de medição de irradiância solar necessários à emissão de outorgas de autorização para implantação e exploração de centrais geradoras fotovoltaicas, de que trata a Resolução Normativa nº 676, de 25 de agosto de 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2016/002/resultado/nt_604af2508.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica nº EPE-DEE-RE-065/2013-r4 de 04 de agosto de 2017. Documento que tem por objetivo apresentar as instruções para solicitação de cadastramento de empreendimentos fotovoltaicos com vistas à obtenção de Habilitação Técnica da EPE, para participação nos leilões de compra de energia elétrica, para o Sistema Interligado Nacional – SIN, onde serão celebrados contratos de comercialização no Ambiente de Contratação Regulada – ACR. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/leiloes-de-energia/Documents/Instrucoes/EPE-DEE-065_2013_R4_2017_UFV.pdf>. Acesso em: 04 de novembro de 2019.

Bezerra, D. B. G., 2019. Aplicação de um Protótipo de Automação Elétrica de Baixo Custo Como Método De Eficiência Energética. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco.

Lima, L. M. S., 2019. Estudo de Caso da Inserção de Minigeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição de Energia Elétrica do Campus Rio Branco da Ufac usando OPENDSS. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2019.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS ASPECTOS SAZONAIS DA NEBULOSIDADE NO PROJETO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS FIXAS EM BRASÍLIA/DF

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 11/02/2021

Licinius Dimitri Sá de Alcantara
Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Ciberespacial
Belém – Pará
https://orcid.org/0000-0002-8140-9072

Mayara Soares Campos
Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/6149872627295455

RESUMO: Utilizando dados meteorológicos do INMET, do programa Radiasol 2, e de cálculos realizados para a estimativa do ângulo de zênite solar, este trabalho tem por objetivo estimar o efeito da orientação de painéis fotovoltaicos fixos levando em conta os aspectos sazonais da nebulosidade, para a cidade de Brasília/DF. A princípio, identificam-se os períodos do ano de menor e maior nebulosidade. Estima-se então os ângulos médios de zênite solar para a época mais nublada, para o ano inteiro e para a época de céu mais claro, os quais foram 4°, 16° e 22°, respectivamente. Usa-se então o programa Radiasol 2 para estimar a densidade de energia solar incidente durante um ano nos painéis inclinados de forma fixa para estes ângulos estimados. A partir desta metodologia, analisa-se a influência da orientação de painéis solares, considerando períodos de nebulosidade, na captação de irradiação. A cidade de Brasília foi escolhida para esta análise por apresentar grande diferença entre a nebulosidade medida no seu período mais nublado em relação à medida no seu período menos nublado do ano. Em Brasília, a reorientação dos painéis de 16° para 22°, com as faces dos painéis voltadas para o Norte, preservará a quantidade de irradiação solar anual captada, estimada em aproximadamente 2040 kWh/m². A diferença é que a reorientação para 22° irá melhorar a captação da irradiação solar recebida nos meses de abril a agosto, mas diminuirá a irradiação recebida em novembro a fevereiro. Uma estratégia para melhorar a captação anual é proposta ao se estabelecer dois ângulos para a orientação dos painéis ao longo do ano, um mais adequado para o período menos nublado e o outro para o período mais nublado, onde se observou um aumento da irradiação anual para 2093,20 kWh/m².

PALAVRAS - CHAVE: Painéis Fotovoltaicos, Dados Meteorológicos, Irradiação Incidente.

ANALYSIS OF SEASONAL ASPECTS OF NEBULOSITY ON THE PROJECT OF FIXED PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS AT BRASÍLIA, BRAZIL

ABSTRACT: By Using INMET meteorological data, the Radiasol 2 software and calculations performed to estimate the solar zenith angle, this work aims to estimate the effect of the orientation of fixed photovoltaic panels, taking into account the seasonal aspects of cloudiness at Brasília, Brazil. At first, the periods of the year with smaller and greater cloudiness are identified. Then, average angles of solar zenith estimated for the

cloudiest season, for the whole year and for the clearest sky season, which were 4°, 16° and 22°, respectively. Thereafter, the Radiasol 2 program is used to estimate the incident solar energy density on the fixed panels inclined at these estimated zenith angles, during one year. The purpose of this work is to analyze the influence of solar panels orientation, considering cloudiness periods, on the irradiation uptake. Brasilia was chosen for this analysis because it presents great difference between the cloudiness measured in its cloudiest period compared to the cloudiness measured at its least cloudy period of the year. At Brasília, the reorientation of the panels from 16° to 22°, with their surfaces facing north, will preserve the amount of annual solar radiation captured, estimated at approximately 2040 kWh/m². The difference is that the redirection to 22° will improve the capture of solar radiation received at the months of April to August, but will decrease the radiation received at November to February. A strategy to improve the annual capture is proposed by establishing two angles for the orientation of the panels throughout the year, one more suitable for the least cloudy period and the other for the cloudiest period, where an increase in annual irradiation was estimated to 2093.20 kWh/m².
KEYWORDS: Photovoltaic Panels, Meteorological Data, Incident Irradiation.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe de bons níveis de incidência de radiação solar, devido sua localização geográfica, com valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro superiores a maioria dos países da União Europeia, o que faz com que o país tenha um grande potencial para explorar a energia solar fotovoltaica (Rüther, 2004).

A energia solar alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade.

Dentre os processos naturais, a fotossíntese (produção de biomassa), o ciclo hidrológico (evaporação/ precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas) são exemplos comuns. O aquecimento solar, a geração de eletricidade e a climatização de ambientes exemplificam os processos e tecnologias produzidos pelo desenvolvimento científico e tecnológico. Um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade (Pereira et al., 2017).

Atualmente, o aproveitamento da energia solar tornou-se uma alternativa viável para complementação da matriz energética brasileira (MME, 2007), podendo ser utilizada para obtenção de energia elétrica. Porém, embora o aproveitamento da energia solar seja uma preocupação bastante antiga em todo mundo, ainda hoje se faz necessário ampliar o conhecimento sobre as variáveis climáticas em relação à eficiência energética do módulo (Martins et al., 2008). Um fator muito importante para se dimensionar sistemas baseados em energia solar é o conhecimento de parâmetros que influenciam diretamente na quantidade de radiação que chega à superfície terrestre, e um desses parâmetros estudados é a nebulosidade, a qual possui características distintas existentes em cada região (Silva e

Souza, 2016; Teles, 2017). A nebulosidade pode ser quantificada em um parâmetro técnico que mede o nível de área de céu encoberto pelas nuvens, adotando uma escala de 0 (céu limpo) a 1 (céu totalmente nublado), por exemplo.

É relevante a realização de estudos sobre ângulos solares, que venham a indicar qual deve ser à disposição do módulo para capturar o maior nível de incidência da radiação no decorrer do ano. Também é importante investigar como algumas características climáticas influenciam na quantidade de radiação que chega à superfície terrestre. Esta radiação, a qual também incide sobre uma superfície receptora para geração de energia, é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa (Hinrichs e Kleinbach, 2009). Segundo os autores, essa radiação direta é aquela que provêm diretamente do Sol e produz sombras nítidas e a difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre.

Quanto mais limpa estiver a atmosfera, menor será a proporção da radiação solar que sofrerá o processo de difusão, e a direção dos raios será bem definida (unidirecional) e determinada pelo ângulo zenital (θ_Z). A espessura da camada atmosférica a ser atravessada pelos raios solares depende proporcionalmente de θ_Z. Do contrário, quando há um aumento da extensão do céu encoberto com nuvens, ocorre um acréscimo em intensidade da componente de radiação difusa e um decréscimo da componente de radiação direta (Souza et al., 2012). Uma vez que, segundo (Varejão-Silva, 2006), a radiação incidente na atmosfera ocasiona reflexão causada pelas nuvens, enquanto que a absorção é realizada por gases como vapor d'água, gás carbônico, ozônio, etc. O espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões que o comprimento de onda incidente e não-seletivo causado por partícula sem suspensão (nuvens e aerossóis).

O estudo realizado neste trabalho considera os dados de radiação solar na cidade de Brasília/DF, que está situada na latitude 15°47'38" Sul e longitude 47°52'58" Oeste. De acordo com estudo realizado pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Sauaia, 2015), a potencialidade de captação de radiação solar para o Centro-Oeste é equivalente à encontrado nas regiões Nordeste e Sudeste, sendo que uma das melhores irradiações do Centro-Oeste e do Brasil se encontra no Distrito Federal. Contudo, a matriz energética do Distrito Federal é majoritariamente dominada por energia hidrelétrica, sendo que desta cerca de 80% é proveniente de Furnas e 20% de Itaipu. Isto torna o Distrito Federal vulnerável aos potenciais efeitos da mudança do clima no fornecimento de energia, considerando sua dependência do Sistema Interligado Nacional e os impactos climáticos esperados por sobre a maioria das hidrelétricas brasileiras (GT Brasília Solar, 2016).

A irradiância solar global é a soma das componentes de radiação direta, difusa e refletida. Essa radiação interage com as partículas presentes na atmosfera, uma vez que, a radiação solar é uma variável meteorológica afetada pela presença de nuvens sobre o céu, como já mencionado por Bastos et al., (2002). Estas partículas atuam como atenuadoras

da radiação solar ao absorver quase toda a radiação no comprimento de onda do infravermelho, e de atenuar a radiação direta (Varejão-Silva, 2006). Portanto, com o intuito de analisar os valores de irradiação média global, o trabalho simulou a irradiação média recebida pelos painéis solares nas diferentes inclinações usando o programa Radiasol 2, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que emprega modelos matemáticos baseado em informações meteorológicas de superfície de todo o Brasil. Este programa contém em seu banco de dados uma compilação de dados climatológicos do Atlas Solarimétrico do Brasil e de estações coletadas pelo programa Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), e interpola valores para o ponto desejado, com base nas coordenadas geográficas definidas pelo usuário (Pinho e Galdino, 2014).

O software Radiasol 2 se tornou bastante popular nacionalmente dentro meio científico e acadêmico na área de energia solar por ser eficaz, de interface amigável e de distribuição livre, sendo geralmente usado em trabalhos onde se faz necessária uma análise do potencial de captação de energia solar em planos de incidência em qualquer inclinação e para um determinado local do território nacional.

Visando um melhor aproveitamento da energia solar incidente, a análise da direção de incidência dos raios solares é importante de modo a orientar os painéis na direção de maior incidência dos raios e assim aumentar o aproveitamento energético dos painéis (Campos e Alcantara, 2016). Este trabalho visa estimar a energia solar captada para certas orientações de painéis fotovoltaicos fixos para a cidade de Brasília/DF, durante um ano. Estas orientações são calculadas tomando como referência a direção média de incidência solar anual, assim como os períodos do ano apresentam menor nebulosidade e maior nebulosidade. Desta forma, é possível fazer uma análise comparativa e propor reajustes na orientação dos painéis caso isso se faça pertinente, levando em conta os aspectos sazonais de nebulosidade.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os passos elaborados que permitem analisar o desempenho de captação de irradiação solar por painéis fotovoltaicos e que são inclinados levando em conta os períodos do ano de menor nebulosidade, maior nebulosidade e sem considerar efeitos de nebulosidade (inclinação fixa otimizada para o ano inteiro).

A Fig. 1 ilustra os valores de nebulosidade para diferentes cidades do Brasil que compõem as Normais Climatológicas do Brasil para o período de 1961-1990, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A nebulosidade mede o nível de área de céu encoberto pelas nuvens em uma escala de 0 (céu limpo) a 1 (céu totalmente nublado). Observa-se que em média um período contínuo de menor nebulosidade (maior insolação) ocorre em Brasília, o qual se estende pelos meses centrais do ano enquanto que períodos de maior nebulosidade ocorrem nos meses iniciais e finais do período anual.

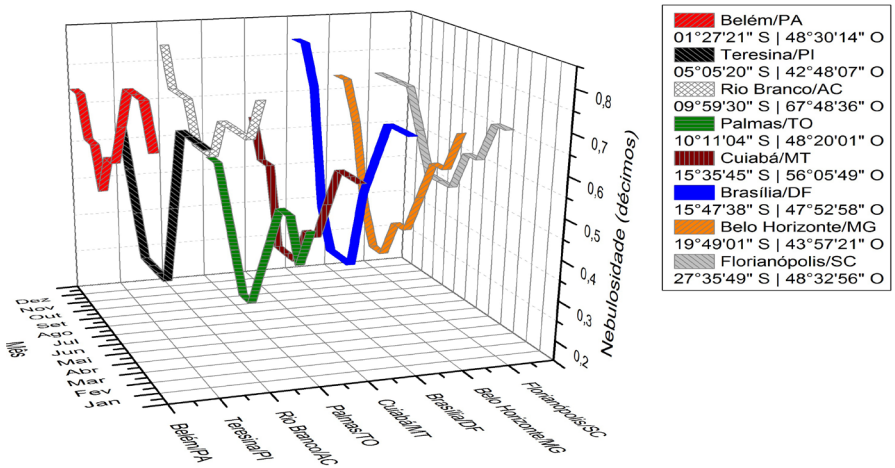


Figura 1 - Dados de nebulosidade das Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990) para diferentes cidades.

A Fig. 1 também indica que em oito cidades consideradas em diferentes pontos do Brasil há uma sazonalidade no decorrer do ano, com períodos de maior nebulosidade no inicio do ano, com um decréscimo entre os meses junho a outubro, voltando a aumentar no final do ano.

2.1 Dados de nebulosidade

A Fig. 2 mostra os valores de nebulosidade na capital federal em uma escala de valores de 0 a 1 para os anos de 2009 a 2018, disponibilizados pela estação convencional local do INMET (código OMM 83377) situada nas coordenadas 15,78° S e 47,92° O a 1159,54 metros de altitude.

Através da curva de valor médio mensal da nebulosidade, também exibida na Fig. 2, e considerando o valor anual computado de 0,56 como limiar de decisão, é possível identificar um período de maior nebulosidade que abrange outubro a abril, e também um período de menor nebulosidade nos meses de maio a setembro. Para estes períodos serão calculados os ângulos de zênite solar médio, assim como o ângulo de zênite médio considerando o ano inteiro. Esses ângulos serão a referência para o ângulo de inclinação dos painéis solares fixos referente a cada período (mais nublado, menos nublado e ano inteiro).

Observa-se na Fig. 2 que podem ocorrer variações dos valores de nebulosidade média de um certo mês, para anos distintos. Ocorrências de fenômenos climáticos como El-Niño e La-Niña podem afetar o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial, e afetando assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias.

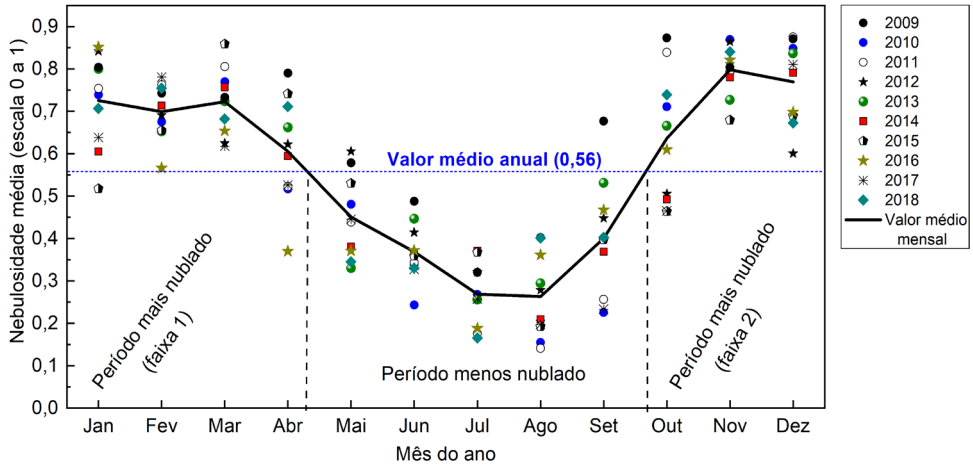


Figura 2 - Valores de nebulosidade média em Brasília/DF nos anos de (2009 a 2018).

2.2 Estimativa dos ângulos de zênite médios

A Fig. 3 mostra os ângulos solares que descrevem a direção de incidência dos raios solares em relação à superfície local. Para que os raios solares incidam normalmente na superfície de um arranjo de painéis solares, este arranjo deve ser inclinado de um ângulo igual ao ângulo de zênite (θ_z) de modo a otimizar a captação da energia solar. Para equiparar a energia solar captada pelos painéis durante a manhã com a captada durante à tarde, o ângulo de azimute é fixado em $\Psi = 0°$, que é o ângulo de azimute solar ao meio dia, momento do dia em que a irradiância solar é máxima. Como consequência, a obtenção de ângulos de zênite solares positivos indicam que o arranjo de painéis solares deve ser inclinado com a face voltada para o sentido do Pólo Norte, e ângulos de zênite negativos indicam que o arranjo deve ser inclinado com a face voltada para o sentido do Pólo Sul.

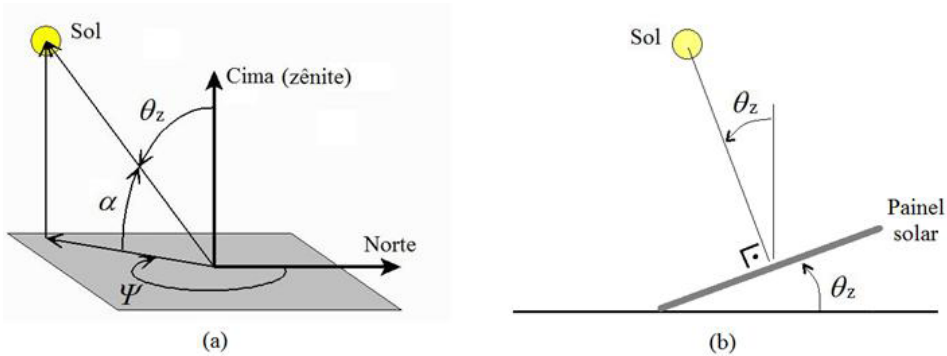


Figura 3 - (a) Ângulos solares Ψ (Ângulo de azimute), α (altitude solar) e θ_z (ângulo de zênite); (b) Inclinação do painel solar para incidência normal dos raios solares.

A Fig. 4 ilustra o ângulo de zênite solar estimado para todos os dias do ano em Brasília, através de programa desenvolvido em (Campos e Alcantara, 2016), usando cálculos descritos em (Messenger, 2010), onde também são destacados os períodos de maior e menor nebulosidade, identificados pela Fig. 2. Os ângulos de zênite para Porto Alegre/RS também são expostos apenas para comparação e referência. Observe que em Brasília, em alguns dias do ano, o ângulo de zênite solar se torna negativo. Nestes dias a radiação solar seria melhor recebida ao se voltar a face dos painéis solares na direção do Pólo Sul. Esta mudança de sinal no ângulo de zênite solar não ocorre para a cidade de Porto Alegre, para a qual θ_Z é sempre positivo e os raios solares são recebidos sempre através dos céus do hemisfério norte. Isto se deve ao fato de que Porto Alegre está situada em uma latitude superior (em módulo) ao ângulo de inclinação axial da Terra que mede 23°26'21".

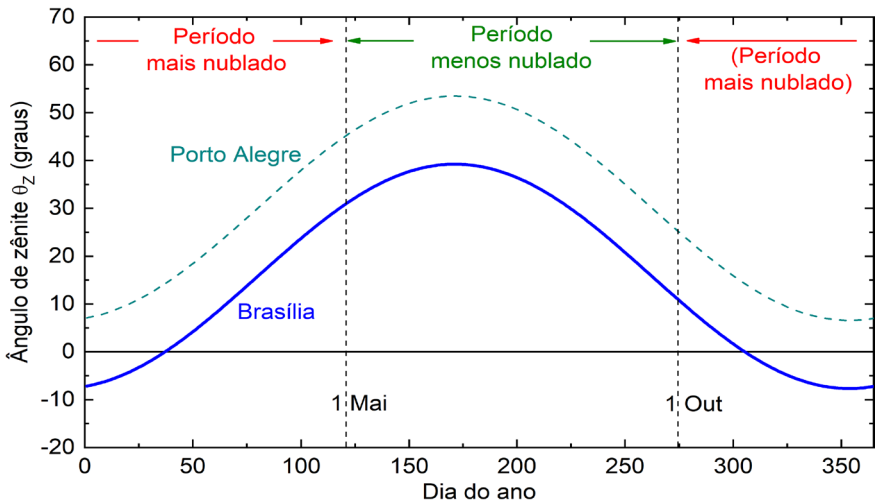


Figura 4 - Ângulos de zênite solar em função dos dias do ano, para $\Psi = 0°$ (azimute solar ao meio dia).

A estimativa do ângulo de zênite médio é feita para três casos ou períodos, a saber, "período menos nublado", "período mais nublado" e "ano inteiro". Esta estimativa é feita através da fórmula de média para variáveis contínuas, expressa pela Eq. (1), onde d_1 e d_2 são o dia inicial e o dia final, respectivamente, do período considerado. A integral na Eq. (1) é resolvida numericamente (método trapezoidal) considerando a função θ_Z da Fig. 4, para a cidade de Brasília. Os parâmetros e valores médios obtidos para cada período são mostrados na Tab. 1. Os valores de θ_{ZM} foram arredondados para inteiro. Observe que o resultado obtido aplicando a média no ano inteiro é aproximadamente igual à latitude de Brasília.

$$\theta_{ZM} = \frac{1}{d_2 - d_1} \int_{d_1}^{d_2} \theta_Z \, dt \qquad (1)$$

PERÍODO DO ANO	d_1	d_2	θ_{ZM}
Menos nublado	121	274	22°
Mais nublado	275	365+120	4°
Ano Inteiro	1	365	16°

Tabela 1 - Ângulos de zênite médios.

O valor de d_2 para o período mais nublado leva em conta a periodicidade anual da função θ_Z. O próximo passo é estimar a incidência de densidade de energia solar nas faces de painéis fotovoltaicos inclinados nos ângulos θ_{ZM} encontrados e expostos na Tab. 1. Isto é feito através do programa Radiasol 2.

2.3 Uso do programa Radiasol 2

A Fig. 5 mostra a interface gráfica e de inserção dos valores de entrada do programa Radiasol 2. No parâmetro de entrada “Inclinação do Módulo” (ou inclinação do arranjo de painéis), foram inseridos os valores (em módulo) obtidos para θ_{ZM}, um por simulação. No parâmetro “Desvio Azimutal” é inserido 0° se θ_{ZM} é positivo e 180° se θ_{ZM} é negativo (no caso da Tab. 1 todos os ângulos médios foram positivos). A partir do mapa do Brasil exibido na interface, selecionou-se o ponto correspondente ao estado de Goiás (estado onde Brasília encontra-se geograficamente) e então a localidade desejada no mesmo (Brasília).

Como origem dos dados da média de irradiação, foi selecionada a base de dados do projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). Esta base de dados disponibiliza valores estimados de radiação a partir de 10 anos de dados construídos através de parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE) e o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR /UFSC), fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR (Pereira, 2017). Este acervo é bastante utilizado em estudos que informam o potencial da região para o aproveitamento energético solar (Silva; Souza, 2016; Morais-Junior et al., 2012). O projeto SWERA, realizado no período de 2001 a 2011, teve como foco principal promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica.

Foram extraídos então os resultados pertinentes a cada inclinação θ_{ZM} do módulo solar. Estes resultados são apresentados e discutidos na próxima seção.



Figura 5 - Interface gráfica inicial do programa Radiasol 2, desenvolvido na UFRGS.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados exibidos na Fig. 6 são de irradiação global recebida por painéis solares nos diferentes ângulos de inclinação e foram obtidos através do uso do software Radiasol 2. Estes valores de irradiação levam em conta também a influência estatística da nebulosidade local, pois a fonte de dados adotada (SWERA) é baseada em médias de dados medidos de radiação solar ao longo de 10 anos. Estes dados, por serem medidos, irão conter naturalmente o impacto da nebulosidade no valor da radiação solar.

A partir dos valores de irradiação mostrados na Fig. 6 e comparando os resultados para painéis inclinados em 22° (otimizada para períodos menos nublados) com os resultados para a inclinação padrão de 16°, observou-se para a primeira inclinação o aumento da radiação recebida durante os meses de abril a agosto. Nos meses de outubro a fevereiro houve uma redução da irradiação captada nos painéis inclinados a 22º, inclusive se tornando inferior à radiação captada nas outras inclinações consideradas. Quando

os painéis são inclinados em 4°, a qual é a inclinação otimizada para os períodos mais nublados do ano, há uma melhoria da captação de radiação nos meses de novembro a fevereiro, mas nos meses intermediários do ano esta captação é reduzida ao comparar-se com as outras duas inclinações.

A Tab. 2 fornece valores da irradiação anual estimada para as inclinações consideradas, onde observa-se que os valores obtidos anualmente para as inclinações de 16° e 22° são bem próximos. Ou seja, é possível inclinar os painéis dentro de uma faixa de 16º a 22° com as faces dos painéis voltadas para o Pólo Norte, sem perda na quantidade de irradiação solar anual recebida. Contudo, no caso da inclinação em 22°, haverá um aumento na captação nos meses de abril a agosto e uma redução na mesma nos meses de outubro a fevereiro.

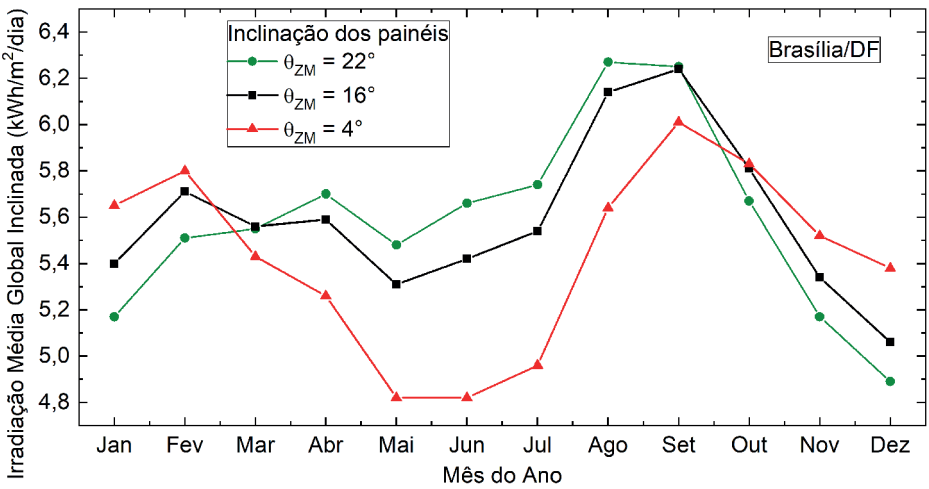


Figura 6 - Resultados de Irradiação média recebida pelos painéis solares nas diferentes inclinações usando o programa Radiasol 2.

INCLINAÇÃO DOS PAINÉIS (θ_{ZM})	INCLINAÇÃO REFINADA PARA PERÍODO	IRRADIAÇÃO ANUAL RECEBIDA (kWh/m²)
22°	Menos nublado	2039,55
16°	Ano Inteiro	2041,00
4°	Mais nublado	1979,71

Tabela 2 - Valores da irradiação total anual recebida pelos painéis nas diferentes inclinações.

A Fig. 7 fornece as estimativas de uma situação idealizada, onde um mesmo arranjo fotovoltaico é inclinado de 22° nos meses de março a setembro visando melhorar a captação no período menos nublado do ano e de 4° nos meses de outubro a fevereiro, para melhorar a captação no período mais nublado. Observou-se que nesta situação houve um aumento estimado da irradiação anual recebida para o valor de 2093,20 kWh/m^2.

Após realizada a avaliação do potencial de captação de radiação solar em um local, o tipo e a quantidade de painéis a serem usados em uma instalação fotovoltaica depende da eficiência dos painéis e da demanda de consumo energético da residência ou estabelecimento comercial que será beneficiado. Ou seja, deve ser feita uma análise prévia dos equipamentos elétricos que serão assistidos pelo sistema, assim como da sua frequência de uso. Dessa forma, poderão haver grandes variações de dimensões entre sistemas fotovoltaicos, dependendo da qualidade dos painéis e da energia elétrica necessária.

Vale lembrar que esta análise se refere a Brasília/DF. Para uma análise referente a outra localização geográfica, onde ocorra períodos com acentuadas diferenças de nebulosidade, este procedimento deve ser realizado usando os dados meteorológicos e os ângulos de zênite solar médios desta localidade.

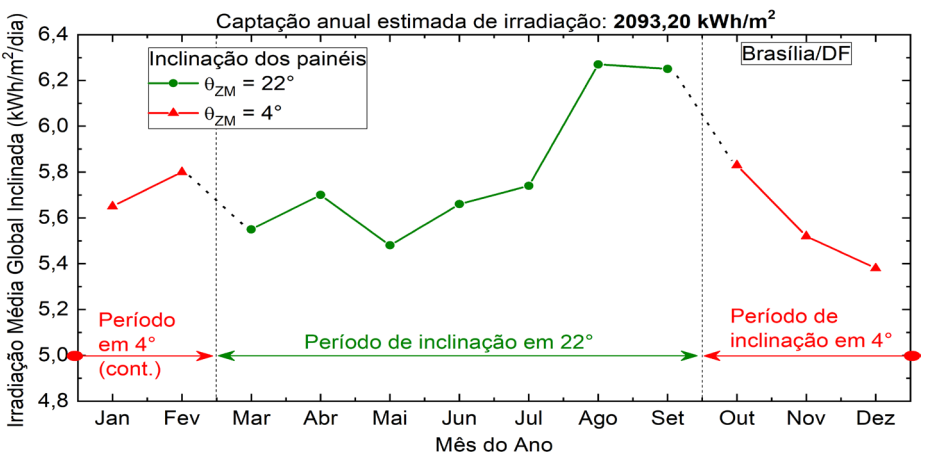


Figura 7 - Resultados de Irradiação média recebida pelos painéis solares comutando a orientação dos painéis para aumentar o desempenho de captação de irradiação.

4 | CONCLUSÕES

Na cidade de Brasília, a partir dos resultados deste trabalho levando em conta as variações anuais de nebulosidade, verificou-se que é possível inclinar os painéis dentro de uma faixa de 16º a 22° com as faces dos painéis voltadas para o Pólo Norte, sem perda na quantidade de irradiação solar anual recebida, a qual foi estimada em aproximadamente

2040 kWh/m² nesta faixa de inclinação. A diferença é que a orientação de 22º é otimizada para o período menos nublado do ano, onde observou-se que nesta inclinação haverá uma melhoria na irradiação solar recebida nos meses de abril a agosto, mas haverá uma diminuição da irradiação recebida de novembro a fevereiro, se comparada com a inclinação de 16° (inclinação padrão dos painéis solares para Brasília).

O ângulo de inclinação de 4° é otimizado para receber a radiação solar no período mais nublado do ano em Brasília, onde observou-se que há uma melhoria da captação de irradiação nos meses de novembro a fevereiro, mas haverá uma grande decréscimo nesta captação nos meses de março a setembro, impactando na redução da irradiação anual, estimada em 1979,71 kWh/m² para esta orientação dos painéis em 4°. Em uma situação idealizada, onde um mesmo arranjo fotovoltaico é inclinado de 22° nos meses de março a setembro a fim de melhorar a captação no período menos nublado do ano e de 4° nos meses de outubro a fevereiro, para melhorar a captação no período mais nublado, observou-se que nesta situação houve um aumento estimado da irradiação anual recebida para 2093,20 kWh/m².

Além da nebulosidade, a baixa eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos comerciais atuais é outro fator que impede uma margem ainda maior de produção de energia elétrica, pois apenas uma relativamente baixa fração da irradiação incidente estimada será convertida em energia elétrica. Contudo, através de avanços nas pesquisas acerca dos materiais envolvidos e dos processos de fabricação dos painéis, espera-se que o aumento da eficiência de conversão fotovoltaica ainda seja factível ao longo dos anos futuros e, consequentemente, uma vantagem maior na produção de energia elétrica, associada também a uma inclinação adequada dos painéis, poderá ser obtida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INME por disponibilizar publicamente os dados de suas estações meteorológicas automáticas e ao Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da UFRGS pela disponibilização do software Radiasol 2.

REFERÊNCIAS

Campos, M. S., Alcantara, L. D. S, 2016. **Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.31,n.4(suppl.), p.570-579.

GT Brasília Solar – Grupo de Trabalho Brasília Solar, 2016. **Programa Brasília Solar: Consulta Pública. Brasília: Secretaria do Meio Ambiente (SEMA-DF)**. Brasil.

Hinrichs, R. A., 2009; Kleinbach, M. **Energia e meio ambiente**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning.

Martins, F. R., Pereira, E. B., Silva, S. A. B., Abreu, S. L., Colle, S., 2008. **Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment**. Energy Policy, v. 36, n. 8, p. 2853–2864.

Messenger, R. A., Ventre, J., 2010. **Photovoltaic systems engineering**. 2. ed. Flórida: CRC Press LLC, cap. 2, p. 21-46.

MME- Ministério de Minas e Energia, 2007. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: < https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030 >. Acesso em: 10 fev 2021.

Morais Junior, H. S., Cavalcante, R. L., Galhardo, M A. B., Macêdo, W., 2012 **Aplicação de Energia Solar Fotovoltaica-Estudo de Caso na Região Amazônica**. Revista Geonorte, Edição Especial, v.2, n.4, p.1303 - 1309.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima F. J. L., Rüther, R.; Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G, 2017. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos

Pinho, J. T., Galdino, M. A, 2014. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Revisada e Atualizada. Cepel - CRESESB. Rio de Janeiro.

Rüther, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública**. Florianópolis: UFSC; LABSOLAR, 2004.

Sauaia, R., 2015. **Proposta para a Energia Solar Fotovoltaica no GDF**. Brasília: ABSOLAR.

Silva, G. D. P. S, Souza, M. J. R., 2016. **Análise de variáveis de projeto de sistema solar fotovoltaico utilizando o modelo SAM: Uma comparação entre Belém, Fortaleza e Brasília**. Revista Brasileira De Energias Renováveis, v5, n.2, p.297-312.

Souza, A. P., Escobedo, J. S., Dal Pai, A., Gomes, E. N., 2012. **Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces**. Engenharia Agrícola, v. 32, n. 2, p. 247-260.

Teles, M. B., 2017. **Avaliação operacional das diferentes arquiteturas de interligação de geradores fotovoltaicos à rede elétrica de baixa tensão**. 2017.84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém.

Varejão-Silva, M. A., 2006. **Meteorologia e Climatologia**. Recife, p. 463.

CAPÍTULO 5

TÉCNICA PREDITIVA DE SEGUIMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA GLOBAL DE ARRANJOS FV EM SOMBREAMENTO PARCIAL

Data de aceite: 01/05/2021

Paulo Robson Melo Costa
Universidade Federal do Ceará, Campus Sobral, Curso de Engenharia Elétrica
http://lattes.cnpq.br/2936328394076426

Lucas Taylan Ponte Medeiros
http://lattes.cnpq.br/0243246687397887

Isaac Rocha Machado
http://lattes.cnpq.br/2956585618746136

Marcus Rogério de Castro
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica e de Computação – PPEEC/UFC
http://lattes.cnpq.br/0396779664792647

RESUMO: Neste trabalho, é proposta uma técnica de Seguimento do Ponto de Potência Máxima Global (SPPMG) capaz de rastrear o ponto de potência máxima em pouquíssimo tempo mesmo na presença de diversos picos de potência na curva Potência-Tensão do arranjo FV. O SPPMG proposto atua estimando a localização dos possíveis picos de potência, verifica qual deles é o maior e, em seguida, afina o rastreamento sobre o maior dos picos utilizado o algoritmo Perturb & Observe (P&O). Um Modo Noturno é também implementado para a atuação do sistema com a tensão fixa quando a geração FV é baixa ou nula. Os resultados obtidos através de simulação computacional no software PSIM mostram que o sistema FV com o SPPMG proposto é capaz de injetar na rede elétrica o máximo de potência disponibilizada pelo sistema FV mesmo na ocorrência de sombreamento, melhorando a eficiência de geração do sistema.
PALAVRAS - CHAVE: SPPMG, GMPPT, Sombreamento Parcial

GLOBAL MAXIMUM POWER POINT TRACKING ESTIMATE TECHNIQUE FOR PV ARRAY UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS

ABSTRACT: This paper proposes a Global Maximum Power Point Tracking (GMPPT) technique capable of tracking the maximum power point in a very short time even in the presence of several power peaks in the Power-Voltage curve of the PV Array. The proposed GMPPT estimates the location of possible power peaks, verifies which one is the highest, and then fine-tunes the tracking over the highest of the peaks using the Perturb & Observe (P&O) algorithm. A Nighttime Mode is also implemented to maintain the PV voltage constant when PV generation is low or zero. The results obtained through computer simulation in the PSIM software show that the PV system with the proposed GMPPT is able to inject the maximum power available by the PV system even in the event of partial shading, improving the system generation efficiency.
KEYWORDS: GMPPT, Partial Shading, Solar Energy.

1 | INTRODUÇÃO

A curva Potência-Tensão (P-V) característica de um sistema fotovoltaico depende das condições de operação (irradiância e temperatura) de cada módulo. Quando o nível de irradiância é o mesmo em todos os módulos, o sistema está em condição de sombreamento uniforme (USC – *Uniform Shading Condition*), e a curva P-V possui um único pico de potência máxima (PPM). Quando os módulos estão submetidos a diferentes níveis de irradiância, o sistema está em condição de sombreamento parcial (PSC – *Partial Shading Condition*) e a curva P-V pode possuir vários PPMs, sendo apenas um o pico de potência máxima global (PPMG) e os demais são os picos de potência máxima locais (PPML).

O seguimento do ponto de potência máxima (SPPM ou no inglês MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) consiste em variar a tensão do arranjo fotovoltaico até que a máxima potência gerada seja atingida. Muitas técnicas de SPPM foram discutidas na literatura (Esram e Chapman, 2007), entretanto, algumas podem ficar confinadas em algum PPML durante o rastreamento.

Uma solução adotada para reduzir os efeitos do sombreamento na geração fotovoltaica é chamada *Distributed Maximum Power Point Tracking* (DMPPT). Existem, basicamente, duas abordagens distintas de DMPPT. A primeira é baseada na utilização de conversores c.c.-c.a. dedicados a cada módulo, denominados microinversores. Deste modo, o rastreamento do PPM é feito individualmente para cada módulo FV (Kjaer, Pedersen e Blaabjerg, 2005). A segunda abordagem consiste em utilizar conversores c.c.-c.c. dedicados a cada módulo, realizando SPPM de cada módulo FV e utiliza inversor(es) centralizado(s) (Femia et al., 2008; Walker e Sernia, 2004). Modelar e projetar um sistema fotovoltaico com DMPPT é notavelmente mais complexo do que implementar uma técnica SPPM convencional, além de envolver mais dispositivos e maior custo financeiro (Femia et al., 2017).

Outra alternativa ao problema causado pelo sombreamento parcial é a utilização de algoritmos capazes de identificar o PPM global (PPMG) mesmo quando a curva P-V apresenta vários picos. Esta técnica é denominada Seguimento do Ponto de Potência Máxima Global (SPPMG ou do inglês GMPPT – *Global Maximum Power Point Tracking*). As estratégias já apresentadas pela literatura são as mais diversas, variando em complexidade, velocidade de rastreio, precisão e tipo de aplicação. Estas técnicas podem ser classificadas em três categorias: técnicas baseadas em métodos convencionais, técnicas que utilizam algoritmos de inteligência computacional e técnicas que combinam os métodos convencionais com algoritmos de inteligência computacional.

Dentre as técnicas baseadas em métodos convencionais, Chen *et al.* (2014) estimam a posição dos picos de potência locais por meio da tensão medida em cada um dos módulos e utiliza o algoritmo P&O para afinar o resultado, a proposta é simples e rápida mas necessita de sensores de tensão em cada módulo, o que aumenta a complexidade da

instalação e os custos financeiros para implementação. Fang e Lian (2017) definiram uma região entre 50 e 90% da tensão de circuito aberto (V_{OC}), região com maior probabilidade de localizar o PPMG, essa região é fatiada em partes onde se aplica o P&O. Ghasemi, Foroushani e Parniani (2016) empregaram rampas de tensão em toda a faixa de 0 a V_{OC}, ao invés de degraus durante o SPPMG, isso diminui as oscilações de tensão e garante uma varredura mais rápida na faixa de tensão. Ahmed e Salam (2015)it is widely assumed that the peaks of a partially shaded P-V curve are located at the multiples of 0.8Voc, where Voc is the open-circuit voltage of the PV module. However, this assumption - known as the of 0.8Voc model for partial shading - is not necessarily true. If the same model is used to design the maximum power point tracker (MPPT propuseram uma forma de estimar a localização na curva P-V dos possíveis picos de potência. Tal técnica consiste em uma correção na técnica que utiliza múltiplos de $0{,}8.V_{OC}$, cujo erro passa a ser relativamente alto quando o número de módulos é maior do que seis. Ramyar, Iman-eini e Farhangi (2017) utilizaram múltiplos de $0{,}8.V_{OC}$ para estimar a localização dos possíveis picos de potência e empregaram o algoritmo P&O, HC e IncCond, respectivamente, para afinar o rastreamento. Patel e Agarwal (2008) empregaram um controlador em malha fechada no conversor c.c.-c.c. intermediário para acelerar o tempo de rastreamento, utilizando o algoritmo P&O onde variações de tensão são aplicadas para o rastreamento não ficar confinado em um pico local. A técnica proposta por Zhu et al. (2016) faz a busca do máximo global continuamente por meio de variações aplicadas a um controlador PI de potência, porém o rastreio é relativamente lento e pode gerar perdas de potência pois é feito continuamente, não avaliando a real necessidade de buscar em toda a curva. Jeyaprabha e Selvakumar (2017) apresentaram um método de compensação de corrente nos módulos sombreados e de compensação de tensão para equalização dos conjuntos de módulos em série, tornando o método complexo e bastante oneroso devido à grande quantidade de componentes, conversores e sensores.

Das técnicas que utilizam algoritmos com inteligência computacional, o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) não depende de informações prévias da folha de dados do fabricante dos módulos FV nem do arranjo e requer baixo custo computacional. Porém, necessita um grande número de interações e produz oscilações na tensão durante a busca (Da Silva et al., 2017). Koad, Zobaa e El-Shahat (2017) empregaram a Interpolação Lagrangiana, utilizando informações da folha de dados do fabricante do módulo FV, para estimar e direcionar as partículas iniciais da técnica PSO para pontos próximos dos possíveis picos locais (LI-PSO). O tempo de convergência é reduzido em relação ao PSO tradicional. O algoritmo *Accelerated* PSO (APSO) foi proposto por Rajendran e Srinivasan (2016), as partículas iniciais deixam de ser geradas aleatoriamente e são determinadas por pontos no intervalo de tensão. O fator de velocidade também é alterado para acelerar a convergência. Já a técnica *Differential Evolutionary* PSO (DEPSO) garante uma convergência mais rápida com baixo custo computacional. Porém, gera muita oscilação na tensão do arranjo FV

(Kumar et al., 2017b). Pragallapati, Sen e Agarwal (2017) empregaram a técnica *Adaptive Velocity* PSO (AVPSO) que minimiza as chances das partículas ficarem presas em um máximo local, além de reduzir as oscilações na tensão do arranjo FV pois as partículas tem suas posições classificadas a cada iteração. A técnica *Weibull Pareto Sine-Cosine* Optimization (WPSCO) foi empregada por Kumar et al. (2017a) como SPPMG.

Alguns trabalhos propuseram técnicas híbridas, formadas pela utilização de um método convencional em conjunto com um algoritmo de inteligência computacional a fim de acelerar a convergência do rastreio ou utiliza-las em condições de sombreamento distintas. Independente do grupo a que pertença, a complexidade da técnica de SPPMG em PSC tende a aumentar quando comparada a técnicas convencionais utilizadas em USC. Nesse sentido, a literatura tem apresentado propostas de detecção de PSC e USC, de forma que a parte mais complexa do SPPMG seja usada apenas em caso de PSC. Assim, o seguimento do PPMG sempre acontece, utilizando as técnicas adequadas que cada tipo de condição de sombreamento exige. Como resultado, o tempo de rastreamento é equilibrado e evita perdas de potência (Manickam et al., 2017; Mohanty, Subudhi e Ray, 2017).

Neste trabalho, é proposto e implementado um algoritmo de SPPMG que atua em duas etapas:

1. Estimação da localização dos possíveis picos de potência na curva *P-V* e verificação de qual desses pontos produz mais potência;

2. Execução do algoritmo P&O a partir do ponto de máxima potência encontrado objetivando refinar o rastreamento e executá-lo continuamente até o próximo ciclo de busca.

Ao mesmo tempo, a técnica proposta, monitora a potência gerada a fim de detectar mudanças significativas nas condições de irradiância e reiniciar a rotina de SPPMG. Para evitar que o sistema fique reiniciando a busca constantemente durante os períodos de baixa irradiância, um modo de operação noturna também é previsto e implementado a fim de manter fixa, em períodos de pouca ou nenhuma irradiância incidente, a tensão do arranjo FV.

2 | EFEITOS DO SOMBREAMENTO PARCIAL

Uma célula FV pode ser representada como mostrado no circuito equivalente na Fig. 1 (Femia *et al.*, 2017). O comportamento da corrente da célula em função da sua tensão (*I-V*) é descrito pela equação de Shockley

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+I\cdot R_s)}{\eta k_B T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \qquad (1)$$

onde $k_B = 1{,}3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann, *T* é a temperatura na

junção em K, $q = 1{,}60217646 \cdot 10^{-19}$ C é a carga elementar do elétron, V é a tensão nos terminais da célula, η é o fator de idealidade $(1 \leq \eta \leq 2)$, I_0 é a corrente de saturação do diodo e I_{ph} é a corrente fotogerada. R_s e R_p são as resistências série e paralelo, respectivamente.

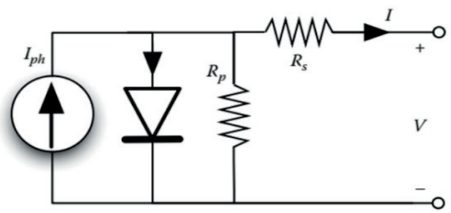


Figura 1 - Circuito equivalente do modelo de um único diodo da célula fotovoltaica.

Quando o sombreamento ocorre uniformemente em todo o módulo (ou arranjo) fotovoltaico, ou seja, mantendo o mesmo nível de irradiância em todas as células, diz-se que o sistema fotovoltaico está em condição de sombreamento uniforme (USC – *Uniform Shading Condition*). O comportamento do sistema FV sob esta condição é exatamente como mostrado na Fig. 2, onde o grau de sombreamento afeta o nível de irradiância, mas não afeta a características *I-V* e *P-V* típicas. Desta forma, a curva *I-V* apresentará sempre apenas um patamar de corrente de curto-circuito e, consequentemente, a curva *P-V* apresentará apenas um pico de potência (PPM). Isto ocorre pois a curva *I-V* de uma associação de células ou módulos fotovoltaicos se forma como mostrado na Fig. 3, para o caso de todos os módulos estarem em STC.

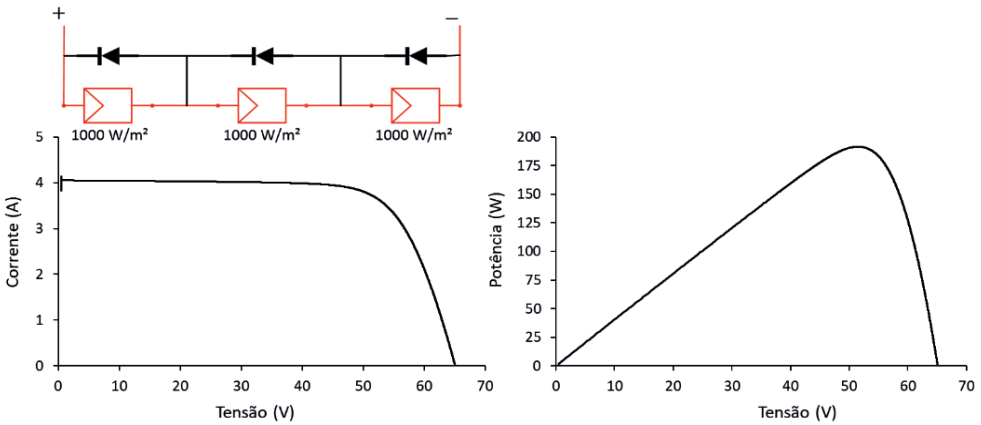


Figura 2 - Curvas *I-V* e *P-V* características referente à associação série de três módulos fotovoltaicos em condições de USC.

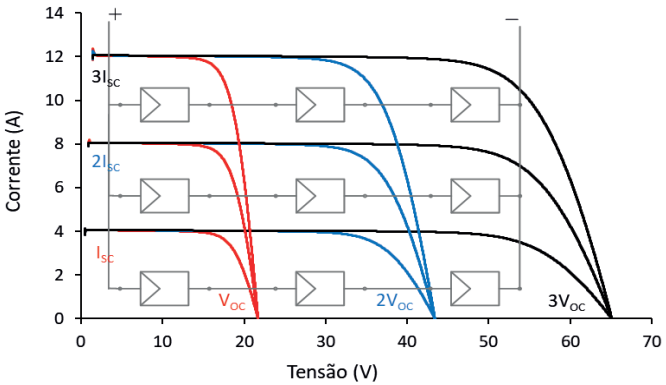


Figura 3 - Curva *I-V* característica referente à associação mista de três módulos fotovoltaicos em condições de STC.

Por outro lado, o sombreamento parcial (PSC – *Partial Shading Condition*) em um sistema fotovoltaico é uma condição na qual apenas uma certa porção do módulo fotovoltaico (ou arranjo) é sombreada, enquanto outras partes permanecem uniformemente irradiadas. É tipicamente causado pela sombra dos edifícios próximos, árvores, postes, chaminés, cabos aéreos, etc. uma célula menos iluminada limita a corrente de toda a *string* de células correspondente. Como consequência, a célula sombreada pode sofrer sobreaquecimento e eventuais danos. Por esse motivo, diodos de *bypass* são comumente instalados em paralelo (polarização reversa) com um conjunto de células no módulo FV para servirem como um caminho alternativo para a corrente nas células sombreadas (Castañer e Silvestre, 2002).

Se o sistema for submetido a sombreamento parcial, uma quantidade considerável de energia é perdida porque o módulo sombreado é curto-circuitado por seu respectivo diodo de *bypass*, forçando sua tensão (e energia) a zero. Como consequência, a curva *I-V* apresenta vários patamares de corrente e a curva *P-V* apresenta vários picos de potência locais (PPML) e um global (PPMG).

Cada *string* de células com um diodo de *bypass* pode produzir um pico de potência na curva *P-V* se estiver submetido a uma irradiância diferente das demais *strings*. Assim, no caso do arranjo da Fig. 4, como são 3 módulos conectados em série, cada um com um diodo de *bypass*, é possível produzir até 3 (total de diodos de *bypass*) picos de potência na curva *P-V* do arranjo FV, se cada uma desses módulos estiver submetido a uma irradiância diferente (Markvart e Castañer, 2003).

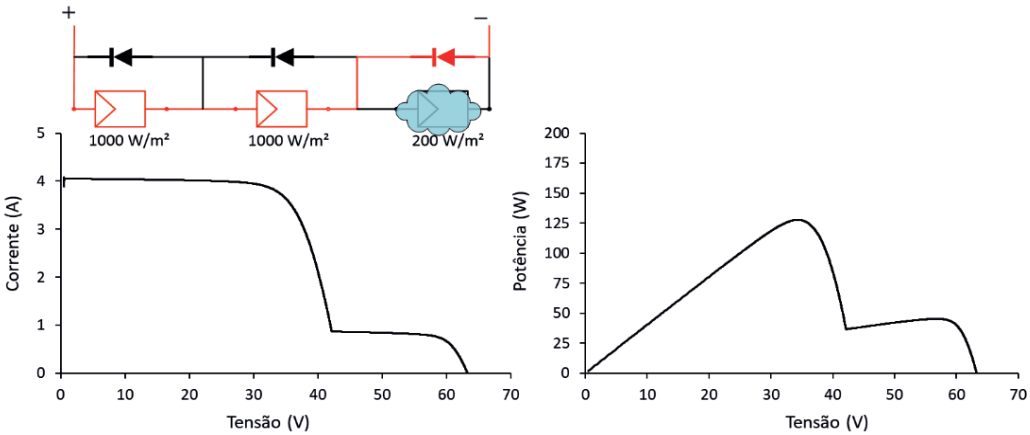


Figura 4 - Curvas *I-V* e *P-V* características referentes à associação série de três módulos fotovoltaicos em condições de PSC com um módulo sombreado.

3 I ALGORITMO DE SPPMG PROPOSTO

Neste trabalho, é proposto um algoritmo de SPPMG para um sistema FV. A técnica de SPPMG proposta neste trabalho atua em duas etapas:

1. Estimação da localização dos possíveis picos de potência na curva P-V e verificação de qual desses pontos produz mais potência;

2. Execução do algoritmo P&O a partir do ponto de máxima potência encontrado objetivando refinar o rastreamento e executá-lo continuamente até o próximo ciclo de busca.

Ao mesmo tempo, a técnica proposta, monitora a potência gerada a fim de detectar mudanças significativas nas condições de irradiância e reiniciar a rotina de SPPMG. Para evitar constantes rastreamentos durante o período de baixa geração, um modo de operação noturna também é previsto e implementado a fim de manter fixa a tensão, em períodos de pouca ou nenhuma luz incidente.

3.1 Estimação da localização dos possíveis picos de potência

A estimação da localização dos possíveis picos de potência na curva P-V, primeira etapa da técnica de SPPMG apresentada neste trabalho, é baseada na estratégia proposta por Ahmed e Salam (2015)it is widely assumed that the peaks of a partially shaded P-V curve are located at the multiples of 0.8Voc, where Voc is the open-circuit voltage of the PV module. However, this assumption - known as the of 0.8Voc model for partial shading - is not necessarily true. If the same model is used to design the maximum power point tracker (MPPT. Esta estratégia consiste numa correção da técnica Tensão de Circuito Aberto Fracionada (*Fractional Open-Circuit Voltage* ou simplesmente $k_1 \cdot V_{OC}$), onde a localização

dos PPMs é estimada por

$$V_{PPM,j} = j \cdot k_1 \cdot V_{OC,m} = j \cdot k_1 \cdot \frac{V_{OC}}{N} \quad (2)$$

onde, N é o número de módulos conectados em série, V_{OC} é a tensão de circuito aberto do arranjo FV, $V_{OC,m}$ é a tensão de circuito aberto de um módulo FV, j representa o número do possível pico (da esquerda para a direita na curva *P-V*) e varia de 1 até N. $V_{PPM,j}$ é a tensão relativa ao j-ésimo PPM. O valor de k_1 mais comumente utilizado é 0,8. No entanto, é preciso enfatizar que a Eq. (2) passa a apresentar elevados erros de estimação quando o sistema está sob PSC ou quando o número de módulos conectados em série é superior a cinco (Ahmed e Salam, 2015)it is widely assumed that the peaks of a partially shaded P-V curve are located at the multiples of 0.8Voc, where Voc is the open-circuit voltage of the PV module. However, this assumption - known as the of 0.8Voc model for partial shading - is not necessarily true. If the same model is used to design the maximum power point tracker (MPPT.

Observando-se a Fig. 5, nota-se a particularidade das curvas *I-V* e *P-V* para um exemplo de arranjo fotovoltaico sob condição de sombreamento parcial. O arranjo em questão é formado por 3 subconjuntos de módulos FV, onde o Subconjunto 1 possui N1 módulos (cada um com seus diodos de *bypass* internos) conectados em série e todos submetidos a irradiância G1. De forma semelhante, são formados os Subconjuntos 2 e 3, com N2 e N3 módulos e irradiância G2 e G3, respectivamente. Neste caso temos, N1=N2=N3 e G1>G2>G3. Como existem três níveis de irradiância, a curva *I-V* possui 3 patamares de corrente e a curva *P-V* apresenta 3 picos de potência.

Tomando a Eq. (2), da técnica Tensão de Circuito Aberto Fracionada ou $k_1 \cdot V_{OC}$, pode-se escrever:

$$V_{PPM,1} = k_1 \cdot N1 \cdot V_{OC,m} \quad (3)$$

Após o primeiro pico (em $V_{PPM,1}$), a corrente decai rapidamente e o segundo patamar de corrente é alcançado, onde V_{sub1} é a tensão que separa a Região 1 da Região 2 (identificadas na Fig. 5). Sendo α uma constante de proporcionalidade, V_{sub1} pode ser escrito da seguinte forma:

$$V_{sub1} = \alpha_1 \cdot N1 \cdot V_{OC,m} \quad (4)$$

Assim, o segundo pico ocorre em:

$$V_{PPM,2} = V_{sub1} + k_1 \cdot N2 \cdot V_{OC,m} \quad (5)$$

De forma semelhante, pode-se aproximar a tensão que separa as Regiões 2 e 3 (V_{sub2}), por:

$$V_{sub2} = V_{sub1} + \alpha_2 \cdot N2 \cdot V_{OC,m} \tag{6}$$

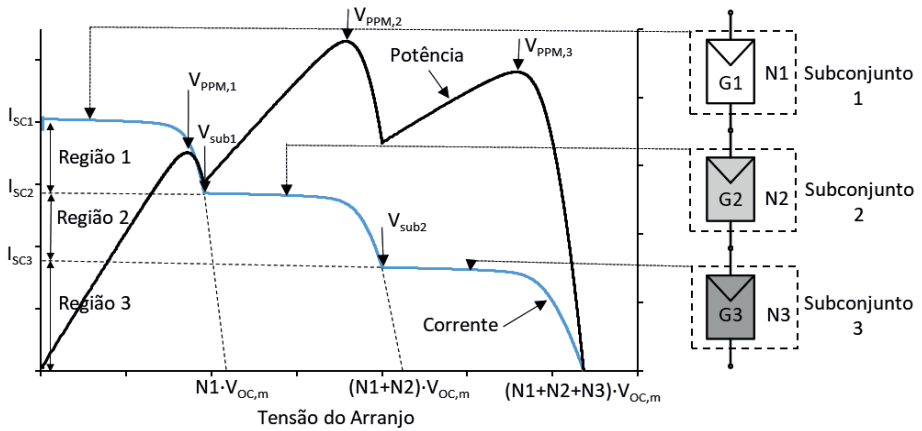


Figura 5 - Curvas *P-V* e *I-V* de um arranjo fotovoltaico em condição de sombreamento parcial.

A localização do terceiro pico (em $V_{PPM,3}$) também pode ser aproximada por:

$$V_{PPM,3} = V_{sub2} + k_1 \cdot N3 \cdot V_{OC,m} \tag{7}$$

Os valores de α_1, α_2, e etc., dependem da relação entre os patamares de corrente (patamar anterior dividido pelo patamar atual). Quanto maior esta relação, maior é o valor do respectivo α. Para simplificação e evitar que seja realizada uma varredura na curva *I-V* apenas para determinar os valores destas constantes, pode-se considerar um único valor de α, logo, $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$.

Substituindo (4) e (6) em (5) e (7) a fim de encontrar os valores das tensões onde ocorrem os picos de potência estimados, tem-se:

$$V_{PPM,1} = k_1 \cdot N1 \cdot V_{OC,m} \tag{8}$$

$$V_{PPM,2} = \alpha \cdot N1 \cdot V_{OC,m} + k_1 \cdot N2 \cdot V_{OC,m} = (\alpha \cdot N1 + k_1 \cdot N2) \cdot V_{OC,m} \tag{9}$$

$$V_{PPM,3} = \alpha \cdot N1 \cdot V_{OC,m} + \alpha \cdot N2 \cdot V_{OC,m} + k_1 \cdot N3 \cdot V_{OC,m} = [\alpha \cdot (N1 + N2) + k_1 \cdot N3] \cdot V_{OC,m} \tag{10}$$

A Tab. 1 apresenta a comparação entre o cálculo das tensões em cada um dos picos pela Técnica $k_1 \cdot V_{OC}$ e pelo método proposto mostrado acima. Pode-se notar que a técnica $k_1 \cdot V_{OC}$ é um caso particular da técnica proposta, onde $\alpha=k_1$. Porém, esse caso implica também nas igualdades $V_{sub1}=V_{PPM,1}$ e $V_{sub2}=V_{PPM,2}$, que são claramente equivocadas, como

pode ser observado na Fig. 5. A coluna Erro na tabela mostra que o erro da técnica $k_1 \cdot V_{OC}$ é maior para os picos mais à direita na curva e para valores maiores de módulos no arranjo.

Pico	Técnica $k_1 \cdot V_{OC}$	Técnica proposta	Erro
$V_{PPM,1}$	$k_1 \cdot N1 \cdot V_{OC,m}$	$k_1 \cdot N1 \cdot V_{OC,m}$	0
$V_{PPM,2}$	$(N1+N2)\cdot k_1 \cdot V_{OC,m}$	$(\alpha \cdot N1 + k_1 \cdot N2)\cdot V_{OC,m}$	$(\alpha - k_1)\cdot N1 \cdot V_{OC,m}$
$V_{PPM,3}$	$(N1+N2+N3)\cdot k_1 \cdot V_{OC,m}$	$[\alpha \cdot (N1+N2) + k_1 \cdot N3]\cdot V_{OC,m}$	$(\alpha - k_1)\cdot (N1+N2)\cdot V_{OC,m}$

Tabela 1 - Comparação entre as técnicas $k_1 \cdot V_{OC}$ e proposta para estimação da localização dos PPM.

Baseado nesta observação, a estimação da localização dos possíveis picos de potência pode ser feita por (11), onde *j* varia de 1 até o número de módulos conectados em série (*N*) do arranjo FV.

$$V_{PPM,j} = [\alpha \cdot (j-1) + k_1] \cdot V_{OC,m} = [\alpha \cdot (j-1) + k_1] \frac{V_{OC}}{N} \tag{11}$$

Como já mencionado, o valor de k_1 pode variar de 0,71 a 0,85 (Esram e Chapman, 2007). Já a constante α pode assumir valores entre 0,8 e 0,97 (Ahmed e Salam, 2015)it is widely assumed that the peaks of a partially shaded P-V curve are located at the multiples of 0.8Voc, where Voc is the open-circuit voltage of the PV module. However, this assumption - known as the of 0.8Voc model for partial shading - is not necessarily true. If the same model is used to design the maximum power point tracker (MPPT.

Ahmed e Salam (2015)it is widely assumed that the peaks of a partially shaded P-V curve are located at the multiples of 0.8Voc, where Voc is the open-circuit voltage of the PV module. However, this assumption - known as the of 0.8Voc model for partial shading - is not necessarily true. If the same model is used to design the maximum power point tracker (MPPT utilizaram α variável em função da irradiância dos módulos, entretanto, o valor da irradiância incidida em cada módulo é uma informação difícil de ser obtida na prática. Mesmo utilizando piranômetros ou células de referência para cada módulo, é possível que a medição destes sensores não reflita a realidade, uma vez que é comum ocorrer sombreamento incidente apenas em parte do módulo. Desta forma, este trabalho propõe a utilização de um valor fixo para α, assim como é feito com a constante k_1. Assim, ainda é possível realizar uma estimativa mais precisa em comparação com a técnica $k_1 \cdot V_{OC}$.

A obtenção dos parâmetros α e k_1 é realizada a partir da análise das curvas *P-V* do arranjo fotovoltaico sob diversas condições de sombreamento. Os valores são escolhidos de forma a obter o menor erro de estimativa em diversos padrões de sombreamento. Para o caso de um arranjo fotovoltaico formado pela associação série de 6 módulos *Kyocera*

KC65T, as constantes obtidas são $\alpha = 0,9$ e $k_1 = 0,72$.

Para comprovar a estimação da localização dos possíveis PPM por (11) e as constantes obtidas, o erro de estimação da técnica proposta é comparado com erro de estimação da técnica $k_1.V_{OC}$, em (2) com $k_1=0,8$. Os casos de estudo são referentes ao arranjo fotovoltaico formado pela associação série de 6 módulos Kyocera KC65T. Na Tab. 2 são mostrados os padrões de sombreamentos nos Casos de 1 a 5, indicando a irradiância sobre cada um dos módulos do arranjo FV. Os resultados dos erros de estimação são mostrados na Fig. 6.

Padrão de sombreamento	Número do módulo e o respectivo valor de irradiância (W/m²)					
	1	2	3	4	5	6
Caso 1	1000	1000	1000	400	400	400
Caso 2	1000	1000	700	700	400	400
Caso 3	1000	1000	800	600	400	400
Caso 4	1000	1000	800	600	400	200
Caso 5	1000	850	700	550	400	250

Tabela 2 - Padrões de irradiância para cada um dos seis módulos KC65T do arranjo.

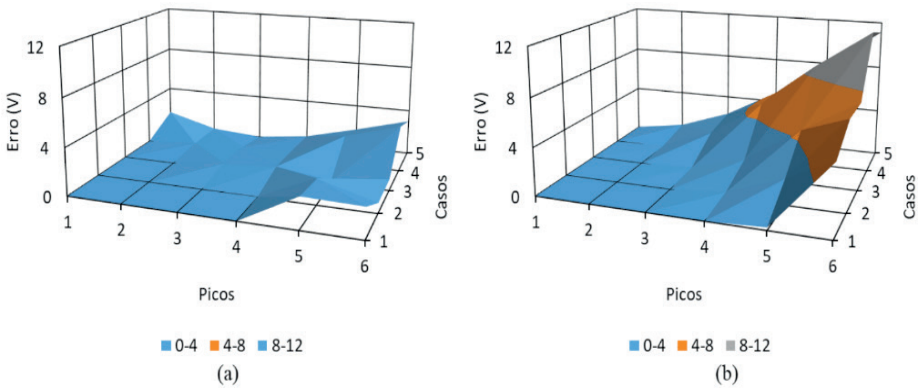


Figura 6 - Comparação do erro de estimação da localização dos PPM da técnica proposta (a) e da técnica $k_1 \cdot V_{OC}$ (b).

O erro de estimação mostrado na Fig. 6 é calculado pela diferença absoluta entre o V_{PPM} obtido na simulação e o V_{PPM} estimado, para cada um dos picos.

$$Erro = |V_{simulado} - V_{estimado}| \quad (12)$$

O número máximo de picos de potência possíveis na curva *P-V* é igual ao número de diodos de *bypass* no arranjo fotovoltaico. Considerando que um módulo FV possui

mais de um diodo de *bypass* e que é possível ocorrer PSC em um único módulo, pode-se reescrever (11) como segue

$$V_{PPM,j} = [\alpha \cdot (j-1) + k_1] \cdot \frac{V_{OC,m}}{N_{db}} = [\alpha \cdot (j-1) + k_1] \frac{V_{OC}}{N \cdot N_{db}} \quad (13)$$

onde, N_{db} é o número de diodos de *bypass* em cada módulo FV e, neste caso, j varia de 1 até $N \cdot N_{db}$. Pode-se utilizar (11) ou (13) para realizar a estimação, sendo recomendada a primeira para arranjos com grande quantidade de módulos e a segunda para arranjos com poucos módulos.

3.2 Algoritmo *P&O* para afinar o rastreamento

Um algoritmo *Perturb & Observe* pode ser utilizado para afinar o rastreamento do PPMG em torno do ponto estimado. Outra funcionalidade de utilizar este algoritmo é que ele é executado de forma contínua, acompanhando alterações de tensão e potência do PPMG.

A técnica P&O é baseada na seguinte estratégia: o ponto de operação do sistema fotovoltaico é perturbado periodicamente pela alteração da tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico, e após cada perturbação, o algoritmo de controle compara os valores da potência gerada pelo sistema antes e depois da perturbação. O sentido da próxima perturbação é alterado caso a perturbação anterior tenha produzido uma variação de potência negativa, como mostrado na Tab. 3. O fluxograma do SPPM baseado em P&O é mostrado na Fig. 7. O intervalo de tempo entre cada iteração é o tempo de perturbação *Tp* e o valor da perturbação aplicada na tensão é *ΔV*.

Perturbação	Variação da potência	Próxima perturbação
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Tabela 3 – Resumo do algoritmo *P&O*.

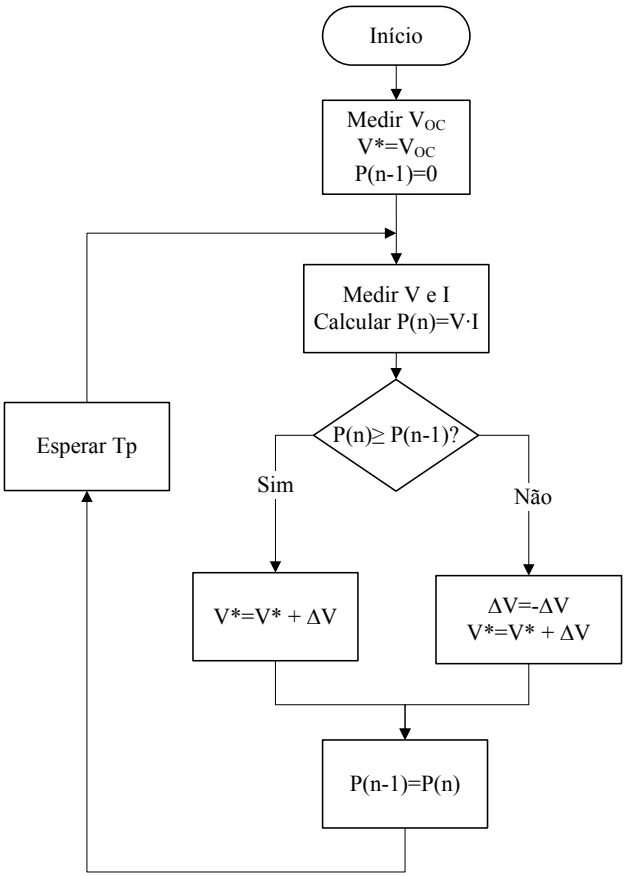


Figura 7 - Exemplo de fluxograma de SPPM baseado no algoritmo *Perturb & Observe*.

A Fig. 8 (a) mostra como o algoritmo *P&O* atua na curva *P-V*, saindo de V_{OC} até alcançar V_{PPM}. No *P&O* a busca é contínua e oscila em torno do pico de potência na curva *P-V*. A característica desta oscilação depende dos parâmetros *ΔV* e *Tp*.

O comportamento no domínio do tempo do SPPM baseado em P&O é mostrado na Fig. 8 (b). Femia *et al*. (2005) demonstraram que o número mínimo de degraus que garantem uma oscilação periódica e estável ao redor do PPM é igual a três, correspondendo a uma amplitude de 2.*ΔV* pico-a-pico e um período de 4.*Tp*. Esta é a condição ideal, mais degraus à esquerda ou à direita do PPM reduziriam a potência FV média. Independente da amplitude *ΔV*, um comportamento estável de 3 níveis é obtido se o intervalo de tempo *Tp* for selecionado corretamente. Se for estabelecido um valor muito pequeno, o algoritmo P&O pode se confundir e entrar em um ponto de operação instável (Venturini *et al*., 2008). Por outro lado, um valor muito grande *Tp* penaliza a velocidade do SPPM.

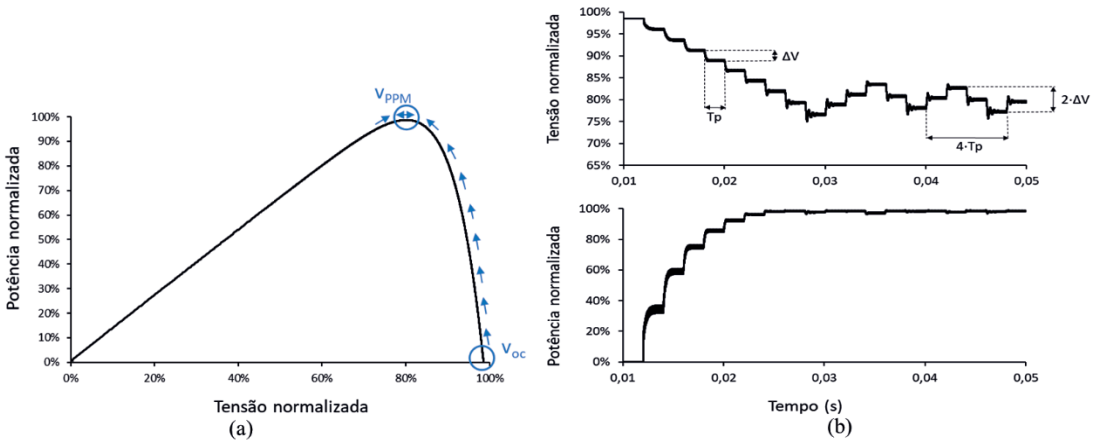


Figura 8 - Comportamento do algoritmo *Perturb & Observe* na curva *P-V* (a) e no domínio do tempo (b).

3.3 Algoritmo de SPPMG proposto

O fluxograma do algoritmo de SPPMG proposto para o sistema FV é apresentado na Fig. 9. O primeiro passo é medir a tensão de circuito aberto V_{OC}, necessária para estimar a localização dos PPM. Em seguida, o algoritmo entra na primeira etapa de rastreamento, iniciando do pico mais à direita na curva, sendo $j=N$. A localização do pico ($V_{PPM,j}$) é estimada por (11). A tensão de referência para o controle da tensão (V^*_{DC}) recebe os valores de tensão estimados para promover a mudança de tensão no arranjo FV. A potência FV gerada em cada uma das tensões (P_{FVj}) é medida. A variável *j*, que representa o número do pico atual, é decrementada até que tensão estimada seja menor do que a tensão mínima permissível ao sistema (V_{DCmin}). A partir daí, V^*_{DC} recebe o valor da tensão que produziu maior potência (V_{PPM}). Já estando bastante próximo do PPMG, a rotina P&O é continuamente executada para afinar o rastreamento. Não investigar toda a curva *P-V* garante maior velocidade do rastreio, uma vez que a região entre 50 e 90% de V_{OC} possui maior probabilidade de compreender o PPMG (Fang e Lian, 2017).

O algoritmo permanece continuamente na segunda etapa executando a função P&O, a cada iteração são verificadas duas condições: se a variação porcentual da potência FV for superior a 10% (durante um intervalo de tempo de 15 ms), indicando uma mudança nas condições atmosféricas, o rastreamento é reiniciado; e se a potência FV for inferior a P_{crit} o sistema passa a operar no ***Modo Noturno*** com a tensão fixa em V_{DC1}. Os valores de P_{crit} e V_{DC1} dependem das características do sistema, como a potência instalada do sistema fotovoltaico e a tensão eficaz da rede elétrica.

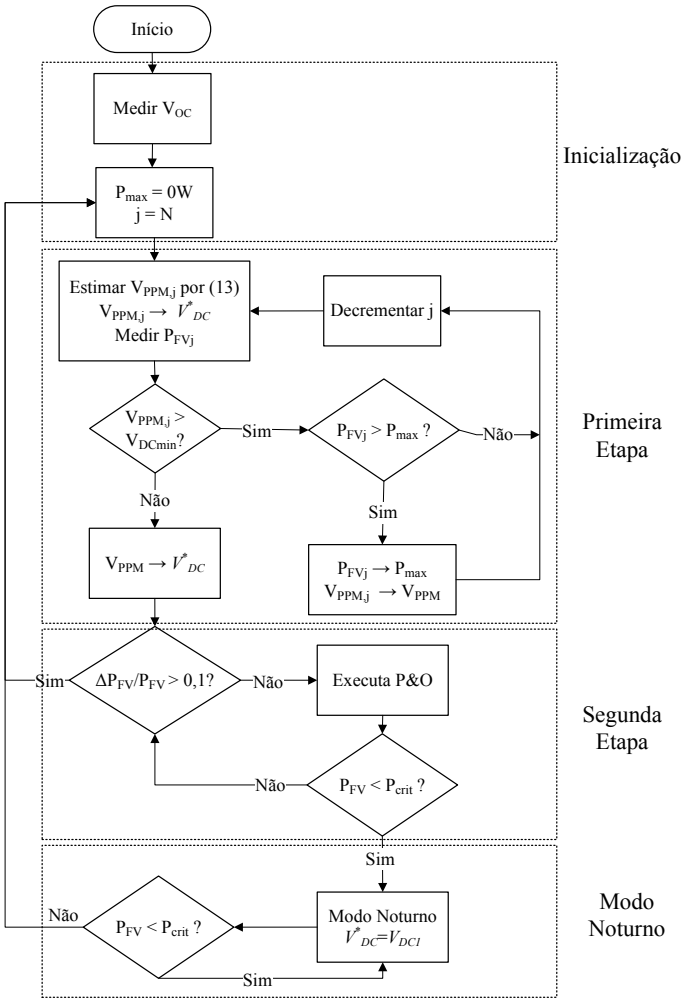


Figura 9 - Fluxograma do algoritmo de SPPMG proposto.

4 | VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE SPPMG PROPOSTO

O algoritmo proposto foi validado por meio de simulações no *software* PSIM v9. Para um arranjo FV formado por seis módulos KC65T conectados em série, utilizou-se os seguintes parâmetros mostrados na Tab. 4 para a técnica de SPPMG proposta.

A Fig. 10 mostra um exemplo de rastreio do PPMG através do algoritmo de SPPMG proposto. O arranjo FV utilizado corresponde a seis módulos KC65T conectados em série. Até o instante de tempo *t=0,4s*, o sistema está submetido ao Padrão de sombreamento 1 com curva *P-V* mostrada Fig. 10 (a) e a seguinte disposição: 2 módulos com 1000 W/m², 2 módulos com 700 W/m² e 2 módulos com 500 W/m². Depois do instante de tempo *t=0,4s*, o sistema sofre transição para o Padrão de sombreamento 2 com curva *P-V* mostrada

Fig. 10 (b) e a seguinte disposição: 2 módulos com 1000 W/m², 2 módulos com 700 W/m² e 2 módulos com 400 W/m². Em ambos os intervalos de tempo é considerado que a temperatura na junção da célula permanece constante com *T=47ºC*.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Constantes para estimação dos PPMs	α	0,90
	k_1	0,72
Variação de tensão do P&O	ΔV	0,25 V
Intervalo entres as perturbações do P&O	Tp	3 ms
Tensão mínima	V_{DCmin}	65,3 V
Potência para entrar no Modo Noturno	P_{crit}	15 W
Tensão de referência (Modo Noturno)	V_{DC1}	100 V

Tabela 4 - Parâmetros do SPPMG proposto para o arranjo FV formado seis módulos KC65T conectados em série.

As Figs. 10 (c) e (d) e mostram a potência e a tensão do arranjo FV durante a execução do SPPMG, respectivamente. A técnica de SPPMG proposta investiga os locais prováveis de surgirem os PPMs, dentro da faixa de tensão permissível, e retorna para o PPMG. Dessa forma, o sistema FV sempre atua no PPMG, não importando a condição de sombreamento que o arranjo FV está exposto. Nota-se que o sistema também responde rapidamente na transição de níveis de radiação. No instante *t=0,4s*, o algoritmo detecta a mudança nas condições de irradiância pela verificação da variação da potência gerada, saindo da rotina *P&O* e reiniciando a busca nos possíveis PPMs.

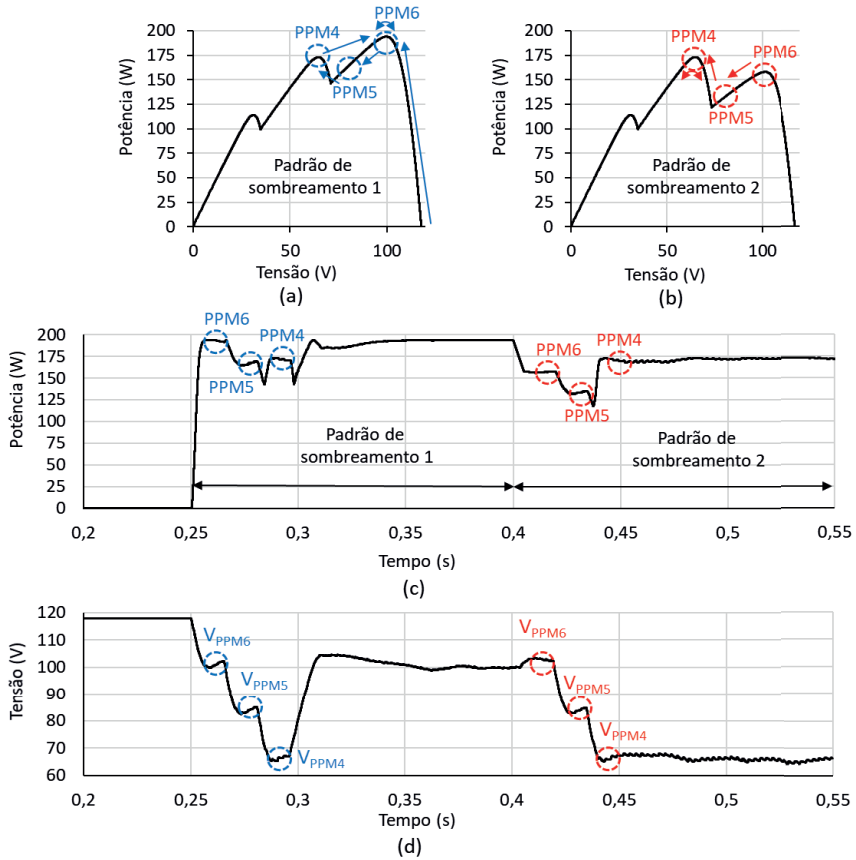


Figura 10 - Exemplo de rastreio do PPMG utilizando o algoritmo de SPPMG proposto.

As seguintes vantagens da técnica de SPPMG proposta podem ser destacadas: Simplicidade; Baixo custo computacional; Salta diretamente para os pontos onde poderiam surgir os picos de potência; Precisão; Detecção de mudança nas condições de irradiância; Modo noturno.

5 I CONCLUSÃO

Neste trabalho, um novo algoritmo de SPPMG, que estima de forma aproximada e bastante eficiente a localização dos possíveis picos de potência na curva *P-V* do arranjo FV, foi proposto. Diversas condições de sombreamento uniforme e parcial foram aplicadas mostrando que o algoritmo é capaz de garantir que o máximo de potência disponível pelo arranjo FV seja extraído. Diferentemente das técnicas de SPPM convencionais utilizadas, o algoritmo de SPPMG evita que o sistema fotovoltaico fique preso sobre um pico local. Além do mais, a estratégia proposta possui baixo tempo de rastreamento e produz pouca

oscilação na tensão (inferior a 1%).

A fim de otimizar a operação de busca do SPPMG, um critério para identificar mudanças nas condições de irradiância e refazer a rastreamento foi estabelecido.

Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo de SPPMG pode ser empregado com eficiência no sistema FV mesmo na ocorrência de sombreamento parcial, contribuindo significativamente na melhoria da geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

Ahmed, J., Salam, Z, 2015. An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 11, n. 6, p. 1378–1387

Castañer, L., Silvestre, S, 2002. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice®. [s.l.] Wiley.

Chen, K. et al, 2014. An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 5, n. 3, p. 978–985.

Da Silva, S. A. O. et al, 2017. Feed-forward DC-bus control loop applied to a single-phase grid-connected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning. IET Renewable Power Generation, v. 11, n. 1, p. 183–193.

Esram, T., Chapman, P. L, 2007. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 22, n. 2, p. 439–449.

Fang, G.-J., Lian, K.-L, 2017. A maximum power point tracking method based on multiple perturb-and-observe method for overcoming solar partial shaded problems. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP).

Femia, N. et al, 2005. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 20, n. 4, p. 963–973.

Femia, N. et al, 2008. Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: Novel approach and system analysis. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 7, p. 2610–2621.

Femia, N. et al. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems.

Ghasemi, M. A., Foroushani, H. M., Parniani, M, 2016. Partial Shading Detection and Smooth Maximum Power Point Tracking of PV Arrays Under PSC. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 31, n. 9, p. 6281–6292.

Jeyaprabha, S. B., Selvakumar, A. I, 2017. Model-Based MPPT for Shaded and Mismatched Modules of Photovoltaic Farm. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 8, n. 4, p. 1763–1771.

Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., Blaabjerg, F, 2005. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, p. 1292–1306.

Koad, R. B. A., Zobaa, A. F., El-shahat, A, 2017. A Novel MPPT Algorithm Based on Particle Swarm Optimization for Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 8, n. 2, p. 468–476.

Kumar, N. et al, 2017a. Peak power detection of PS solar PV panel by using WPSCO. IET Renewable Power Generation, v. 11, n. 4, p. 480–489.

Kumar, N. et al, 2017b. Rapid MPPT for Uniformly and Partial Shaded PV System by Using JayaDE Algorithm in Highly Fluctuating Atmospheric Conditions. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 13, n. 5, p. 2406–2416.

Manickam, C. et al, 2017. Fireworks Enriched P&amp,O Algorithm for GMPPT and Detection of Partial Shading in PV Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 6, p. 4432–4443.

Markvart, T., Castañer, L, 2003. Practical Handbook of Photovoltaics. [s.l.] Elsevier.

Mohanty, S., Subudhi, B., Ray, P. K, 2017. A Grey Wolf-Assisted Perturb &amp, Observe MPPT Algorithm for a PV System. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 32, n. 1, p. 340–347.

Patel, H., Agarwal, V, 2008. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. IEEE Transactions on Industrial Electronics.

Pragallapati, N., Sen, T., Agarwal, V, 2017. Adaptive Velocity PSO for Global Maximum Power Control of a PV Array Under Nonuniform Irradiation Conditions. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 7, n. 2, p. 624–639.

Rajendran, S., Srinivasan, H, 2016. Simplified accelerated particle swarm optimization algorithm for efficient maximum power point tracking in partially shaded photovoltaic systems. IET Renewable Power Generation, v. 10, n. 9, p. 1340–1347.

Ramyar, A., Iman-eini, H., Farhangi, S, 2017. Global Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Arrays Under Partial Shading Conditions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 64, n. 4, p. 2855–2864.

Venturini, R. P. et al, 2017. Analysis of limit cycle oscillations in maximum power point tracking algorithms. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference.

Walker, G. R., Sernia, P. C, 2004. Cascaded DC–DC Converter Connection of Photovoltaic Modules. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 19, n. 4, p. 1130–1139.

Zhu, Q. et al, 2016. Research and Test of Power-Loop-Based Dynamic Multi-Peak MPPT Algorithm. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 63, n. 12, p. 7349–7359.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DE TOPOLOGIAS EM TRAÇADOR DE CURVA I-V APLICADOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Data de aceite: 01/05/2021

Ana Lyvia Pereira Lima de Araújo
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Arthur Vinicius dos Santos Lopes
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Adson Bezerra Moreira
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

RESUMO: As instalações de painéis fotovoltaicos utilizam equipamentos que verificam os diagnósticos, certificando-se das informações dos módulos fotovoltaicos, como também auxiliar nas operações e manutenções. No entanto, este equipamento possui um elevado valor de obtenção para pequenos empreendimentos. O desenvolvimento de um traçador de curva I-V apresenta uma importância significativa para a avaliação do módulo fotovoltaico, verificando possíveis defeitos nas células que consiste o módulo, a partir de descontinuidades na curva característica natural do traçador. Dessa forma, será abordado sobre as cargas variáveis que podem ser implementadas juntamente com o módulo fotovoltaico, realizando comparações para a obtenção da carga com o melhor desempenho, com resposta rápida e baixo custo. Por conseguinte, será apresentado a simulação da carga variável, o conversor CC-CC buck-boost com o painel fotovoltaico, a partir da implementação do sistema de controle de corrente e controle de tensão, obtendo-se a curva característica I-V.

PALAVRAS - CHAVE: Painéis Fotovoltaicos, Traçador de curva I-V, Cargas Variáveis.

ANALYSIS TOPOLOGIES IN I-V CURVE TRACER APPLIED IN PHOTOVOLTAIC MODULES

ABSTRACT: Photovoltaic panel installations use equipment that verifies diagnostics, making sure photovoltaic module information, as well as assist in operations and maintenance. However, this equipment has a high value of obtaining for small businesses. The development of an I-V curve tracer is of significant importance for the evaluation of the photovoltaic module, verifying possible defects in the cells consisting of the module, from discontinuities in the characteristic curve tracer's. Thereby, will be addressed the variable loads that can be implemented together photovoltaic module, performing comparisons to obtain of the load with the best performance, quick response and low cost. Therefore, it will exhibit the variable load simulation, the DC-DC converter buck-boost with the photovoltaic panel, will be present, based on the implementation of the current control and voltage control system, obtaining the characteristic curve I-V.

KEYWORDS: Photovoltaic Panels, I-V Curve Tracer, Variable Loads.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos ocorreu um elevado crescimento em instalações de sistemas de geração de distribuição de energia elétrica no Brasil, ultrapassando 1 GW de potência instalada em micro e mini geração distribuída de energia. E a partir da regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015), possibilita que o consumidor possa gerar sua energia elétrica através de fontes renováveis. Por conseguinte, a fonte que apresenta maior destaque é a fotovoltaica, responsável por cerca de 870 megawatts (MW) de potência instalada, com 82,6 mil micro e mini usinas. Nos estados de Minas Gerais superando 16,7 mil unidades de geração com 212,3 MW de potência instalada, Rio Grande do Sul apresentando 12 mil unidades com potência instalada de 144,4 MW e São Paulo que atingiu 14,5 mil unidades com 117,4 MW, formam os estados brasileiros que mais desenvolveram a micro e minigeração no país (ANEEL, 2019).

Em 2017, em nível global foi instalado aproximadamente 95 GW, apresentando um crescimento exponencial no mercado de energia solar na China, Estados Unidos e Índia. Tais mercados mostram equilíbrio entre as instalações de grande porte, em usinas solares e geração distribuída, instalações em telhados de casas e empresas, destacando a energia fotovoltaica como um resultado para várias necessidades, desde a produção de energia para uma residência como também em uma grande usina solar, produzindo energia para comunidades (PORTAL SOLAR, 2019).

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis por converter a radiação solar em eletricidade, tais módulos possuem características elétricas que possibilitam a verificação da sua qualidade e desempenho. Esta verificação pode ser realizada através da curva característica do módulo fotovoltaico, proporcionando obter a corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima e entre outros parâmetros. Após projetar e ao ser feita a instalação dos painéis solares, para garantir as ótimas operações, é necessário conhecer vários fatores que influenciam a eficiência do sistema de energia, pois esses sistemas são expostos a diversas falhas e defeitos que afetam a energia gerada, como, falhas por curto-circuito, circuito aberto e mesmo algum dano durante o transporte e instalação dos painéis. O diagnóstico torna-se uma prática fundamental para detectar possíveis defeitos e com o traçado da curva I-V é possível identificá-los nas células que fazem parte do módulo.

Com o elevado crescimento do número de instalações de painéis fotovoltaicos (FV) no Brasil, equipamentos para diagnosticar, o funcionamento durante a instalação FV e evitar possíveis problemas que podem surgir ao longo dos anos no sistema elétrico, auxiliando nas operações e manutenções. O equipamento é conhecido como Traçador de curva I-V, capaz de fornecer a curva característica. Dessa forma, a partir da curva I-V pode-se determinar a corrente de curto circuito, a tensão de circuito aberto, a máxima potência

e outros fatores.

Este artigo tem como objetivo apresentar conceitos fundamentais para a construção de um traçador de curva I-V, realizar a comparação entre os métodos de obtenção da curva I-V e com isso desenvolver a simulação da carga variável com o módulo fotovoltaico, observando o seu desempenho.

2 | CARACTERIZAÇÃO DO MÓDULO FV

Para a verificação das características dos arranjos ou das placas fotovoltaico, se faz necessário um dispositivo que consiga varrer todos os pontos da curva característica do painel, podendo verificar a corrente máxima fornecida, a tensão máxima e informar o ponto de maior transferência de potência para uma determinada carga. Para a análise é necessário um modelo matemático equivalente do painel FV, apresentado na Fig. 1.

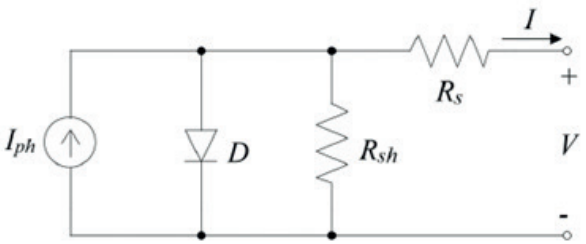


Figura 1 - Modelo elétrico equivalente do FV.

Para análise matemática, o modelo equivalente do painel FV é tomado como base, onde *Iph* é caracterizado com uma fonte de corrente que depende da irradiação a qual a célula está submetida. A irradiação é a relação entre a quantidade de energia solar que penetra em uma determinada área, cuja a unidade é expressada em Watts por metro quadrado (W/m^2).

Considerando a R_s e R_{sh} , em que são respectivamente as resistências em série e paralelo. Sendo, Rs a resistência intrínseca do material semicondutor somada com resistência dos contatos e interconexões metálicas e a resistência entre os contatos metálicos e o semicondutor. A R_{sh} (ou resistência Shunt) é causado devido a fuga de elétrons através da junção P-N, a qual ocorre devido defeitos no cristal ou impurezas na junção P-N.

Analisando a Fig. 1, é necessário obter as características IxV do painel fotovoltaico. Utilizando-se dos teoremas da análise de circuitos elétricos e aplicando a lei de Kirchhoff das correntes, a corrente do painel, e dada por (1).

$$I = Iph - Id - Irsh \quad (1)$$

Em que *Id* é a corrente que passa pelo diodo em antiparalelo com a fonte de corrente *Iph.* Sendo *Id* é calculado por (2).

$$Id = Io \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot Vd}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1\right] \tag{2}$$

Dada a Eq. (2), q é a carga do elétron (1.602 x 10^{-19} C), k é a constante de Boltzmann (1.38065 x 10^{-23} *J* / *K*), Io é a corrente de saturação reversa do diodo ou corrente de fuga, e T é a temperatura da junção P-N(Temperatura da célula FV em Operação), expressa em Kelvin. Enquanto, V_d é a tensão do diodo. Calculada por (3).

$$V_d = Irsh \cdot Rrsh \tag{3}$$

Substituindo (2) e (3) em (1) a equação da corrente do painel FV e rescrita por (4).

$$I = Iph - Io \cdot \left[exp\left(\frac{q \cdot Vd}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1\right] - \frac{V + I \cdot Rs}{Rsh} \tag{4}$$

O modelo matemático pode ser ampliado, fazendo a conexão de outras células em série, idealmente iguais e submetidas ao mesmo nível de irradiação. A Eq. (4) pode relacionar com o equivalente das resistências série e paralelo, de acordo com (5).

$$Rs' = Rs \cdot Ns \; e \; Rsh' = Rsh \cdot Ns \tag{5}$$

Substituindo (5) em (4), resulta em (6).

$$I = Iph - Io \cdot \left[exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot Rs')}{n \cdot k \cdot TNs}\right) - 1\right] - \frac{V + I \cdot Rs'}{Rsh'} \tag{6}$$

O valor tensão de saída da célula depende da tensão do diodo e a queda de tensão provocada pela resistência série.

2.1 Curva Característica IxV e PxV

Os módulos fotovoltaicos são caracterizados por suas curvas de corrente versus tensão e potência versus tensão, no entanto os valores de corrente e tensão dos painéis, sofrem influência das características de temperatura e irradiação.

Na Fig. 2 são mostradas a curva I-V e a curva P-V, na qual pode-se destacar alguns pontos importantes:

- I_{SC} - Corrente de curto-circuito da célula, em que é a corrente máxima que o painel fornecer, mediante a tensão está tendo a zero.
- I_{MP} - Corrente onde há máxima geração de potência;
- P_{MAX} - O ponto em que o painel entrega a máxima potência;

- V_{MP} - Tensão para ocorrer a máxima geração de potência;
- V_{OC} - Tensão de circuito aberto, em que é o valor máximo de tensão que o painel consegue fornecer, mediante a corrente seja zero.

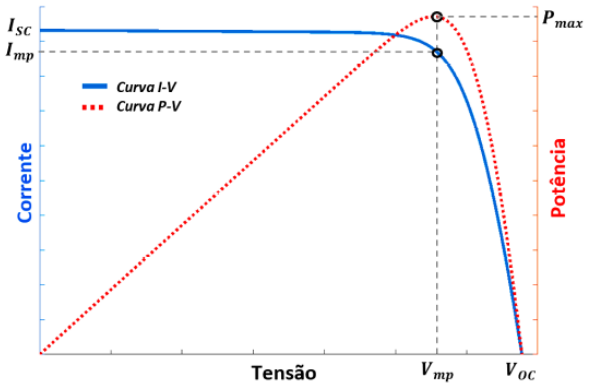


Figura 2 - Curvas características IxV e PxV

3 | PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRAÇADOR FOTOVOLTAICO

O traçador de curva I-V de painéis solares é um equipamento importante para a verificação do funcionamento do arranjo dos painéis, mediante os dados de temperatura e irradiação, pode-se observar a qualidade de desempenho dos módulos. A curva fornecida por esse equipamento, permite que um especialista analise o painel solar FV.

Este equipamento é constituído de diversos estágios, como mostrado na Fig. 3, apresentando bloco de aquisição e condicionamento, processamento e controle, utilizando também uma carga variável em sua composição. O esquema é composto pelos blocos do traçador, com sensores para obter os parâmetros de tensão, corrente, temperatura e irradiação. Os valores de tensão e corrente são obtidos para uma determinada condição de temperatura da célula e de irradiância solar no plano do painel. O esquema também apresenta ferramentas para a interface homem-máquina (IHM) como, computadores, aplicativos, proporcionando interação do homem com a máquina, podendo o mesmo visualizar a curva I-V e valores medidos para a análise de possíveis problemas, em todos os instrumentos comerciais.

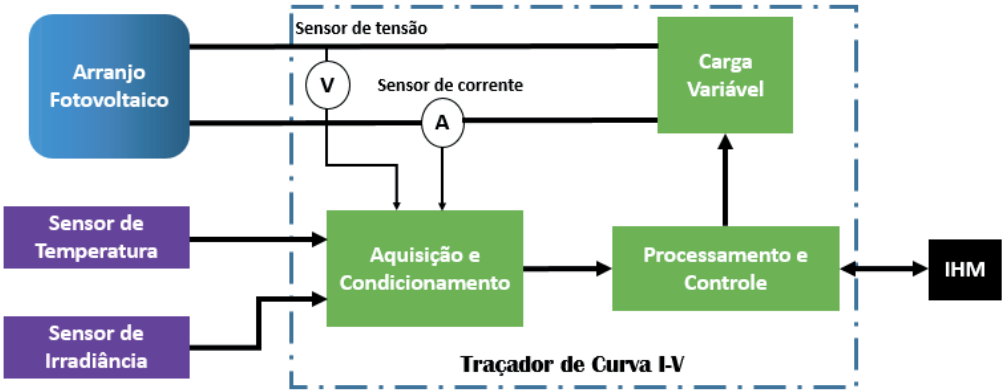


Figura 3 - Esquemático do Traçador de Curva I-V.

O componente de controle central é o microcontrolador, em que é realizado a medição e o controle dos parâmetros elétricos. Os dados podem ser enviados para o computador, sendo possível obter o comportamento graficamente do painel com as variações de carga, definindo a região de máxima potência.

4 I CARGA VARIÁVEL

Em um trabalho recente, E. Duran et al. (2017) propuseram que, para obter a curva característica do módulo FV é necessário que haja uma carga variável que possibilite obter todos os pontos da curva I-V. Para isso utiliza-se alguns tipos de carga para realizar esse processo, quatro tipos de métodos podem ser utilizados para essa finalidade: carga resistiva variável, conversor CC-CC com carga resistiva, carga eletrônica e carga capacitiva.

4.1 Carga Resistiva Variável

Em uma análise prévia, é encontrado um dispositivo, que pode percorrer a curva do I-V, sendo caracterizado com uma resistência variável, um potenciômetro, ele idealmente pode percorrer todos os pontos da curva, funcionando, como um circuito aberto, em que sua resistência adquire um valor muito grande, teoricamente tende para o infinito, caracterizado o circuito aberto, A. Ibrahim (2011). A configuração é ilustrada na Fig.4.

Outro ponto de interesse desse dispositivo é quando a sua resistência tende para o valor zero, representando o curto-circuito para o painel, obtendo a corrente de . A partir do ajuste da carga é possível verificar todos os pontos importantes da curva dos módulos.

No entanto, esse método utilizando o potenciômetro é limitado devido a dissipação de potência e é necessário, realizar a mudança de resistência manualmente. De modo análogo, foram utilizadas chaves eletrônicas (MOSFET, IGBT e TBJ), controladas automaticamente, para fazer abertura e fechamento das chaves que ligam as cargas resistivas ao painel

solares, simulando o funcionamento do potenciômetro E. VAN DYK et al. (2002). O ajuste de carga a partir das chaves eletrônicas melhora a precisão do sistema, devido o tempo de manobra das chaves ser automatizado, retirando qualquer interferência no tempo de realização das mudanças de resistência realizada manualmente.

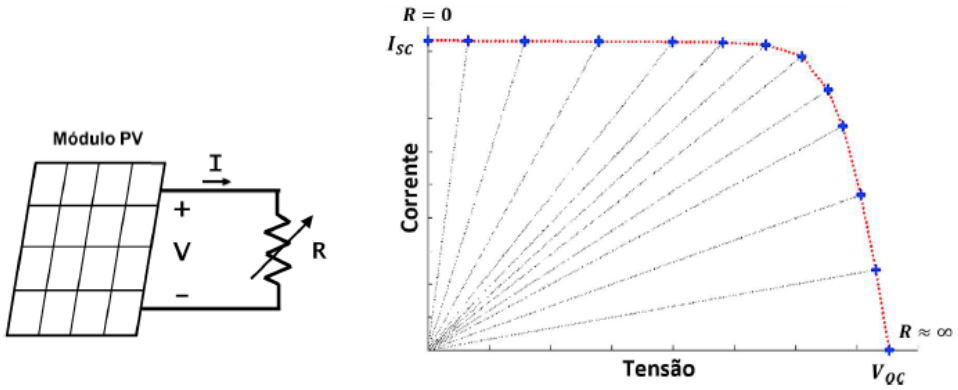


Figura 4 - Carga resistiva variável e curva I-V obtida a partir da carga resistiva variável.

4.2 Capacitiva

O capacitor é um componente que permite armazenar energia elétrica e manter essa energia durante um certo período. Em J. MUÑOZ et al (2006), é utilizado o capacitor juntamente com o IGBT na saída do painel fotovoltaico, para obter a curva característica I-V de matrizes fotovoltaicas com correntes de curto-circuito de até 80 A e tensões de até 800 V. Na Fig. 5, observa-se o esquema da carga capacitiva composta por um capacitor e a chave, e as formas de ondas de corrente e tensão após o fechamento da chave, t=0. Quando o capacitor é descarregado, ou seja, com a tensão zero em seus terminais e a chave fechada, o painel fornece corrente de curto-circuito e o carregamento do capacitor é iniciado. Dessa forma, a tensão do capacitor se eleva do ponto de curto-circuito até alcançar a tensão de circuito aberto. Portanto, com o capacitor descarregado inicialmente e se aplicar uma tensão em seus terminais, a carga aumenta gradativamente até a tensão de circuito aberto.

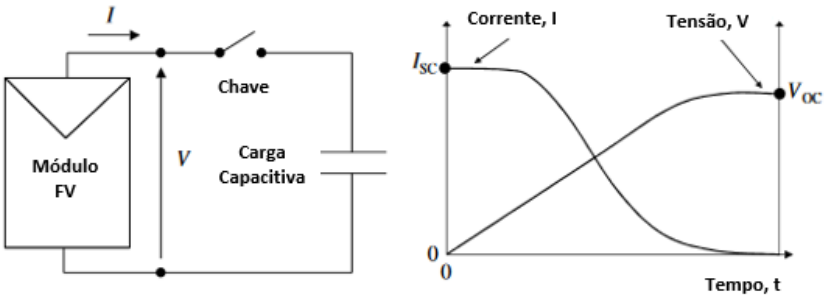


Figura 5 - Carga capacitiva ideal e Formas de onda de corrente e tensão.

O método de carregamento do capacitor para a obtenção da curva I-V e P-V também é utilizado em F. SPERTINO et al. (2015), fazendo o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), destacando como principal problema o dimensionamento correto do capacitor para a aplicação e assim obter resultados precisos, com curvas uniformes e suaves. Dessa forma, foram realizados testes para uma mesma irradiância e temperatura em módulos de diferentes tecnologias, com diferentes faixas de capacitâncias, observando o comportamento das formas de ondas de corrente e tensão para a obtenção do ponto de máxima potência.

4.3 Carga Eletrônica

A carga eletrônica consiste em dispositivos semicondutores aplicados em Eletrônica de potência, como, os transistores, MOSFET, IGBT E BJT, em que são controlados por tensão, corrente e frequência.

Em Y. Kuain et al. (2006) é utilizado como carga eletrônica, o MOSFET que opera em sua região linear, como uma carga controlada eletronicamente, possuindo como grande vantagem a sua rápida varredura. O circuito adotado, a partir da varre as curvas de maneira rápida, formando as características I-V e P-V dos módulos fotovoltaicos, juntamente com o dispositivo é adicionado um resistor de potência em série, utilizado para dissipar a energia gerada pelo módulo FV, como ilustrado na Fig. 6. Nessa aplicação, foram realizados testes com o módulo FV e o MOSFET, analisando a operação e as equações características, cujo o ponto de operação do dispositivo é definido a partir da característica do painel fotovoltaico, característica do MOSFET e a conexão do circuito, com todos os dados fornecidos, o dispositivo eletrônico operado de acordo com a tensão . Em casos que se apresenta um valor de corrente de saída dos painéis mais elevada, como é verificado em um conjunto de painéis fotovoltaicos, pode-se associar vários MOSFETS em paralelo.

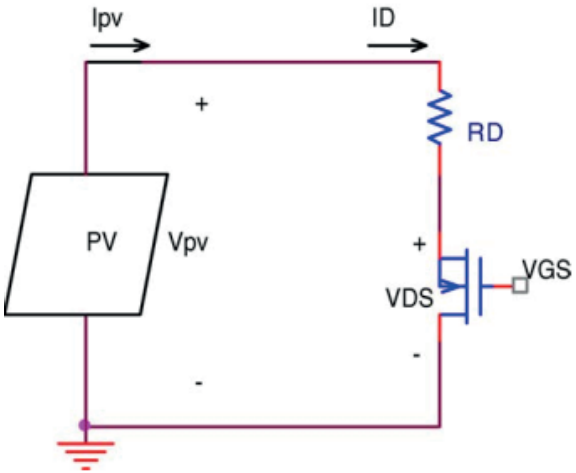


Figura 6 - Circuito Esquemático.

Em V. Leite et al. (2010), assim como em Y. Kuain et al. (2006), realiza-se um teste que utiliza o MOSFET de baixa tensão, ou para potências maiores o MOSFET de alta tensão ou IGBT. Na Fig. 7, a curva em vermelho tem-se a curva característica de um módulo fotovoltaico e a curvas em azul verifica-se as curvas características de um MOSFET, para dada tensões, V_{GS}. Dessa forma, a interseção de característica do módulo com a carga eletrônica determina o ponto de operação, para uma dada tensão , quando for rastreado o em um sinal adequado, o ponto de operação do MOSFET varre o I_{FV} - V_{FV}. O circuito proposto, além dos dispositivos de potência, apresenta um conversor CC-CC, circuito eletrônico com isolação galvânico, evitando danos aos sistemas de aquisição de dados e melhorando a segurança para os operadores. Este circuito proposto é utilizado para analisar as condições de temperatura, irradiância, sombreamento parcial, como também identificar mau funcionamento.

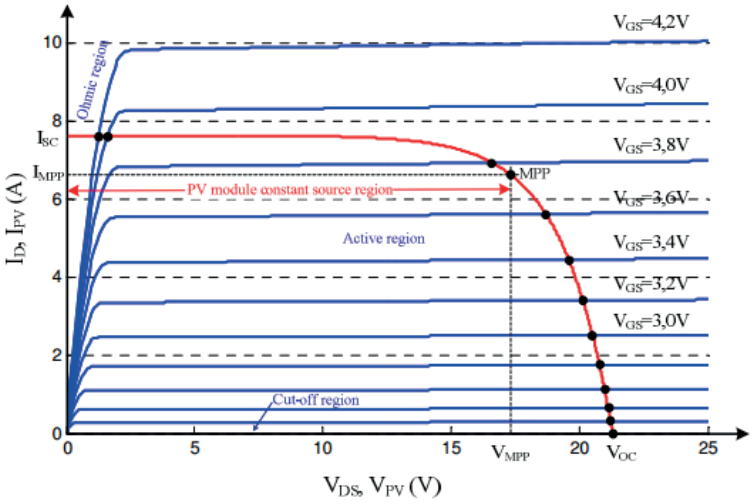


Figura 7 - Curvas características do Módulo FV e MOSFET.

4.4 Conversor CC-CC resistiva

O conversor CC-CC é um circuito eletrônico utilizado na conversão de uma tensão em corrente contínua aplicado na sua entrada em outra tensão em corrente contínua, apresentando uma amplitude diferente na sua saída, podendo ou não inverter a sua polaridade, a partir da modulação por largura de pulso (PWM). Frequentemente os conversores são utilizados em sistemas fotovoltaicos para converter a tensão em outra, como também para realizar a busca de máxima potência através de algarismo MPPT, o *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Na Fig. 8 pode-se observar o esquema com a aplicação da mesma.

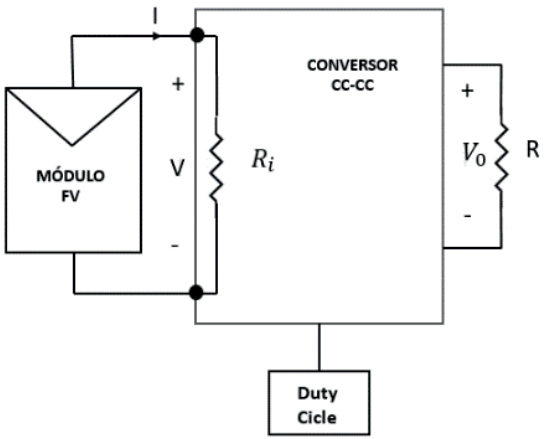


Figura 8 - Esquema com o conversor CC-CC.

Em E. Duran et al. (2007), é utilizado o conversor buck-boost, que se obtém-se a corrente do terminal do módulo variando de zero a corrente de curto-circuito, realizando também a análise teórica do conversor Cúk e SEPIC, por meio de simulações, observando que o conversor SEPIC permite a execução da varredura completa da curva I-V, possuindo como principal vantagem a facilidade a incorporação do isolamento galvânico, não invertendo a polaridade na tensão de saída. O Cúk possui característica de execução semelhante ao SEPIC. O método empregado, o Buck-Boost é o único que proporciona traçar os pontos de curva descrita anteriormente, pois com o conversor Buck não se consegue traçar os pontos de curva próximos a corrente de curto-circuito () e com o conversor Boost não se alcança os pontos próximos da tensão de circuito aberto (). Enquanto utilizando o SEPIC e o Cúk, a curva I-V do painel é com menor ondulação. Dessa forma, o método desenvolvido permite, a exibição direta da curva I-V, podendo traçar essa curva nas duas direções, de I_{SC} para V_{OC} ou de V_{OC} para I_{SC} e reproduzir parcialmente a curva I-V.

No M. Kazerami (2007), é utilizado o conversor Buck, composto pelo dispositivo de potência IGBT, um diodo de recuperação rápida, um indutor, um capacitor e na saída dos terminais do buck é conectado um resistor fixo, apresentando o controle do mesmo, através de simulações para verificar a capacidade de operação, com resistência variável, corrente variável e potência variável. Além disso, utilizando um filtro passa-baixa na entrada com a finalidade de reduzir as ondulações de corrente indesejadas nos terminais da fonte, a um nível tolerado pela fonte e dos painéis. A partir da análise dos resultados das simulações, comparadas com os dados do fabricante do painel, o esquema com a carga aplicada é possível obter a curva característica IxV, concluindo-se é a carga introduzida é de alto desempenho, com estrutura simples, com resposta rápida e de baixo custo.

O conversor buck-boost não-inversor CC-CC, ou seja, com a tensão de saída positiva, possuindo como característica quatro estados de comutação, formado por um conversor buck e boost em cascata, eliminando um capacitor no conversor buck e por duas chaves para a comutação e obtenção das possibilidades dos conversores: buck, boost, buck-boost com apenas uma topologia, representando como sua principal característica Arash A. Boora et al. (2008). Na Fig. 9 é ilustrado o esquema do conversor buck-boost positivo.

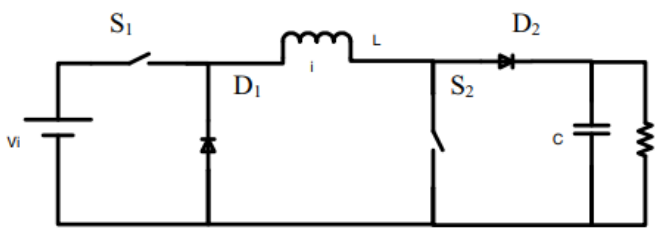


Figura 9 - Conversor CC-CC Buck-Boost não-inversor.

5 I SIMULAÇÃO DO CONVERSOR BUCK-BOOST POSITIVO COM O PAINEL FOTOVOLTAICO

Para a análise do traçador de curva I-V foi utilizado um conversor CC-CC para emular uma carga variável no painel FV. O conversor CC-CC Buck-Boost positivo foi adotado e realizados de simulação foram obtidos a partir do software SIMULINK.

Na Tab. 1 mostra-se as informações do painel FV utilizadas para a simulação.

Características Elétricas	
Máxima Potência (Pmax)	130,064W
Tensão (Vmap)	17,390V
Corrente (Imp)	7,390A
Tensão (Voc)	21,900V
Corrente (Isc)	8,020A

Tabela 1: Características Elétricas do FV

O conversor CC-CC foi dimensionado para atender os valores da Tab. 1. Para realizar o dimensionamento do Buck-Boost positivo, baseia-se na potência de saída *Po*.

$$P_0 = R \cdot I_0^2 \tag{7}$$

Sendo Io é a corrente de saída, a que circula no resistor, foi escolhida Isc do painel FV.

Dessa forma, pode-se obter a corrente de curto-circuito, utilizando (7) e substituindo os valores de *Isc* e *Po* extraído da Tab. 1, obtém-se o valor de R.

$$R = \frac{130{,}064}{(8{,}02)^2} = 2.02\Omega \tag{8}$$

O indutor foi dimensionado a partir (9):

$$Lmin = \frac{(1-D)^2 \cdot R}{2f} \tag{9}$$

Onde *f* é a frequência de chaveamento, que foi definida com 40kHz, D é a razão cíclica do chaveamento das chaves, com valor 0.43. O valor do indutor mínimo *(Lmin)* é .

O valor do capacitor é determinado por (10).

$$C = \frac{D \cdot Vo}{R \cdot f \cdot \Delta Vo} \qquad (10)$$

Em que Vo é a tensão de saída do conversor e ΔVo é a ondulação da tensão de saída a qual foi definida em 5%.

Na Fig. 10 são mostrados o painel FV e o conversor buck-boost com o sistema de controle e na Fig. 11 é destacado o diagrama do sistema de controle de corrente e controle de tensão.

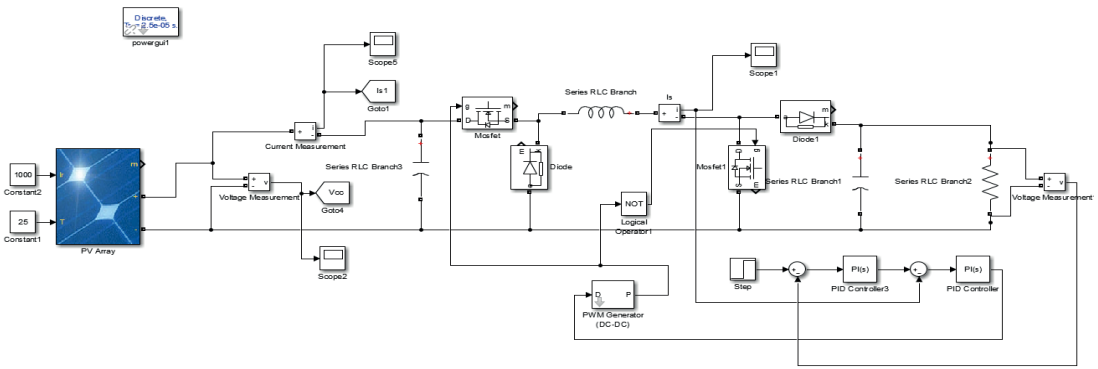


Figura 10 – Conversor CC-CC conectado ao painel FV com controle de corrente e controle de tensão.

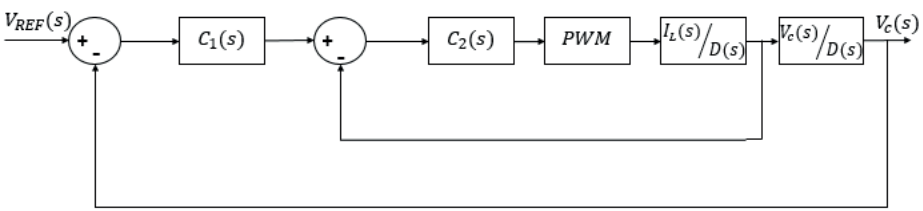


Figura 11 – Sistema de controle para o conversor CC-CC Buck-Boost.

A metodologia utilizada para projetar o controlador é a partir da resposta em frequência, sabendo que é necessário ter um sistema de controle com uma margem de ganho maior que 6dB e uma margem de fase entre 30° e 60°. O controlador PI, C_1(s) e C_2(s) projetado apresenta uma malha interna de corrente e outra externa de tensão como ilustra a Fig.11, em que o tempo de resposta da malha interna é mais rápido que a malha externa.

Em MOREIRA, Adson Bezerra et al. (2019), com base em (11) e (12), obtêm-se os

parâmetros T_i e K_p.

$$T_i = \frac{1}{\omega_c \tan(\pi + |G_i(j\omega_c) - MP_d)} \tag{11}$$

$$k_p = \frac{1}{|G_i(j\omega_c)| \cdot |1 - \frac{j}{\omega_c T_i}|} \tag{12}$$

Onde, w_c é a frequência de cruzamento de ganho e MP_d é a margem de fase desejada.

Os valores T_i e K_p são apresentados na Tab.2.

Malha Interna		Malha Externa	
T_i	K_P	T_i	K_P
1,0585	0,0016	-0,0350	0,0030

Tabela 2: Parâmetros T_i e K_p – Controlador PI.

A função de transferência que relaciona a tensão de saída e a razão cíclica e a corrente do indutor e a razão cíclica é destacada em (13) e (14) Carralero, Leandro Leysdian Oro et al. (2019).

$$\frac{V_c(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{(1-D)^2}[1 - \frac{LD}{R(1-D)^2}s]}{\frac{LC}{(1-D)^2}s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2}s + 1} \tag{13}$$

$$\frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{\frac{V_{in}}{R(1-D)^3}[(1+D) + RCs]}{\frac{LC}{(1-D)^2}s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2}s + 1} \tag{14}$$

5.1 Resultados Preliminares

Foram obtidas as formas de ondas da corrente e tensão do painel fotovoltaico, como também a forma de onda da potência, na Fig. 12.

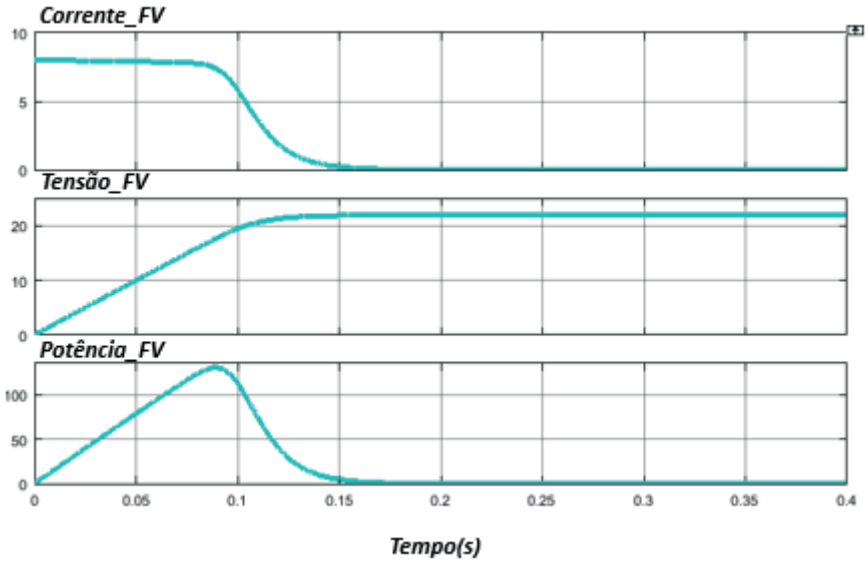


Figura 12 - Formas de onda da corrente, tensão e potência do painel fotovoltaico.

Com o controle de tensão e corrente é possível obter uma distribuição de pontos adequada para traçar a curva I-V e a curva P-V, em que pode ser observada na Fig.13.

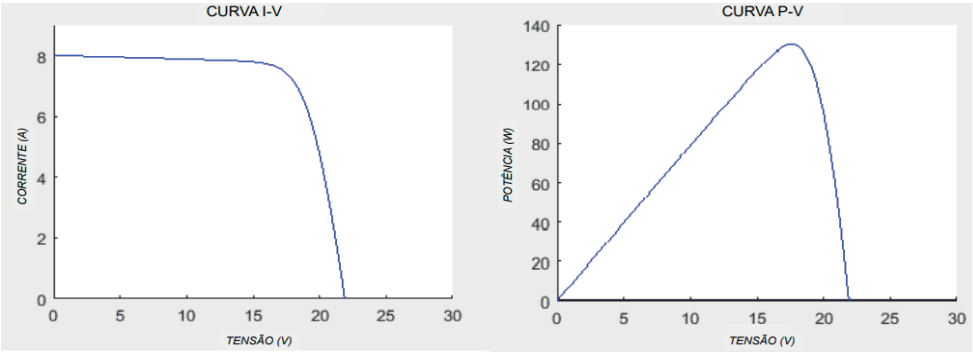


Figura 13: Formas de onda da corrente-tensão e potência-tensão do painel FV.

Na Fig. 14 são mostradas as curvas I-V do módulo fotovoltaico, modelo KC130T.

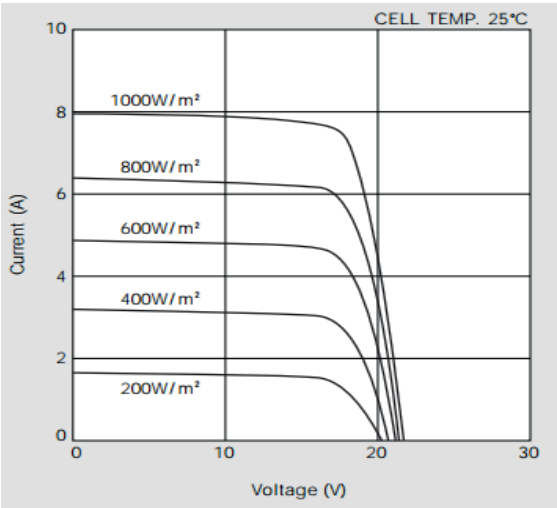


Figura 14: Formas de onda da corrente-tensão para o módulo KC130T.

Para uma irradiância de 1000W/m² e temperatura de 25°C, a curva I-V do fabricante do modelo, Fig.14 e a curva I-V da Fig.13 obtida a partir da simulação do módulo fotovoltaico juntamente com o conversor buck-boost apresentam comportamentos semelhantes, com os pontos de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência e potência máxima possuindo valores próximos. Na Tab.3 é destacado a comparação entre os valores simulados e comerciais.

Parâmetro	Simulação	Comercial	Erro Relativo (%)
I_{SC}	8,017A	8,020A	0,037%
V_{OC}	21,899V	21,900V	0,005%
I_{MP}	7,399A	7,390A	0,122%
V_{MP}	17,586V	17,600V	0,080%
P_M	130,119W	130,064W	0,042%

Tabela 3: Comparação entre valores simulados e comerciais.

6 | CONCLUSÃO

A curva característica permite avaliar a qualidade e o desempenho do módulo fotovoltaico, em que é obtida a partir de uma determinada irradiação e temperatura, assim são obtidos tensão e corrente. Há equipamentos comerciais com estas funcionalidades, no entanto, podem-se construir o traçador de curvas I-V, através de componentes eletrônicos

de fácil obtenção.

Neste artigo apresentou-se a análise das cargas variáveis, assim como seus circuitos para a obtenção da curva característica I-V em módulos fotovoltaicos. A partir da análise da topologia do conversor CC-CC com carga resistiva para a implementação do traçador de curva I-V, verificou-se que o conversor buck-boost possui vantagens em relação aos demais, possibilitando a atuação de quatro modos de operações, sendo adotada a operação buck-boost, para o seu dimensionamento, podendo-se obter uma melhor distribuição de pontos. Com a simulação foi possível obter a curva característica I-V e ao comparar a curva I-V na folha de dados do painel FV, observa-se que a curva obtida é semelhante, assim foi alcançado com a análise e simulação um bom desempenho do conversor para traçar as curvas do painel FV.

A utilização deste método para se obter a curva característica por meio do projeto de controle de corrente e tensão destaca-se com uma resposta rápida e baixo-custo, um método com flexibilidade, já que permite alterar a velocidade e direção de varredura.

REFERÊNCIAS

A. Ibrahim, \Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements," Smart Grid and Renewable Energy,vol. 02, no. 02, pp. 169{175, 2011}.

Arash A. Boora ; Firuz Zare ; Gerard Ledwich ; Arindam Ghosh A General Approach to Control a Positive BuckBoost Converter to Achieve Robustness against Input Voltage Fluctuations and Load Changes, 2008.

Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acessado em 02 de setembro de 2019.

Carralero, Leandro Leysdian Oro et al. Emulador PV Baseado Em Um Conversor CC-CC Buck-Boost De Quatro Interruptores. Anais Da Sociedade Brasileira De Automática, V. 1, N. 1, 2019.

E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-de Cardona, and J. Andujar, "A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules," in 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 36, pp. 413–417, IEEE, 2007

E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-de Cardona, J. Galan, and J. Andujar, "Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review," in 2008 33rd IEEE Photovolatic Specialists Conference, pp. 1–6, IEEE, may 2008.

Energia Fotovoltaica. Disponível em < https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html > Acessado em 02 de setembro de 2019.

E. van Dyk, A. Gxasheka, and E.Meyer,\Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules," in Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic SpecialistsConference,2002., no. 603, pp. 1516{1519, IEEE, 2002.

F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, and M. Chiaberge, “Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems,” Solar Energy, vol. 119, pp. 461–473, sep 2015.

J. Muñoz and E. Lorenzo, “Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays,” Solar Energy, vol. 80, pp. 1489–1497, nov 2006.

M. Kazerani, “A High-Performance Controllable DC Load,” in 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, no. 1, pp. 1015–1020, IEEE, jun 2007.

MOREIRA, Adson Bezerra et al. Control of powers for wind power generation and grid current harmonics filtering from doubly fed induction generator: Comparison of two strategies. IEEE access, v. 7, p. 32703-32713, 2019.

V. Leite and F. Chenlo, “An improved electronic circuit for tracing the IV characteristics of photovoltaic modules and strings,” International Conference on Renewable Energies and Power Quality, vol. 1, no. 8, pp. 1224–1228, 2010.

Y. Kuai and S. Yuvarajan,“An electronic load for testing photovoltaic panels,” Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 308–313, mar 2006.

CAPÍTULO 7

METODOLOGIA PARA GERENCIAMENTO E MANEJO DE CARGA APLICADA A CONSUMIDORES RESIDENCIAIS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Data de aceite: 01/05/2021

Andrei da Cunha Lima
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul, RS

Laura Lisiane Callai dos Santos
Universidade Federal de Santa Maria
Campus Cachoeira do Sul, RS

ABSTRACT: This work aims to develop a methodology for managing, forecasting and handling the load of single-phase residential consumers that have distributed generation with storage (battery bank) and that are framed in the white tariff modality. A server was developed in conjunction with a database for storing and handling customer data, such as voltage and current, from photovoltaic generation, the utility network and the battery bank, obtained in a period of 5 minutes between measurements. An internet of things (IOT) microcontroller is used to employ the proposed methodology, using an electronic circuit to perform data collection and communication with the server. Through the user's load curve, the current energy requirement and the level of energy in the batteries, the system is responsible for carrying out the user's intelligent load management, acting in a more economically advantageous way. In load management, the server assesses the user's current energy needs and their instant photovoltaic generation. According to the energy requirement and how much power the user is generating, the server manages the load through solid state relays connected at the utility's network input, at the photovoltaic generation output and between the battery bank and the inverter.
KEYWORDS: Database; Distributed Generation; Load Handling; Server; White Tariff.

RESUMO: Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para o gerenciamento, previsão e manejo de carga de consumidores residenciais monofásicos que possuam geração distribuída com armazenamento (banco de baterias) e que estejam enquadrados na modalidade tarifária branca. Foi desenvolvido um servidor em conjunto com um banco de dados para armazenamento e manejo de dados do cliente, como tensão e corrente, proveniente da geração fotovoltaica, da rede da concessionária e do banco de baterias, obtidos em um período de 5 minutos entre medições. É utilizado um microcontrolador *internet of things* (IOT) para empregar a metodologia proposta, utilizando um circuito eletrônico para realizar a coleta dos dados e a comunicação com o servidor. Através da curva de carga do usuário, da necessidade energética atual e do nível de energia nas baterias, o sistema fica responsável por realizar o manejo inteligente de carga do usuário, atuando de maneira mais vantajosa economicamente. No manejo de carga, o servidor avalia a necessidade energética atual do usuário, e sua geração fotovoltaica instantânea. De acordo com a necessidade energética e com quanto o usuário está gerando de energia, o servidor realiza o manejo da carga através de relés de estado sólido ligados na entrada de rede

da concessionária, na saída da geração fotovoltaica e entre o banco de baterias e o inversor.
PALAVRAS - CHAVE: Banco de Dados; Geração Distribuída; Manejo de Carga; Servidor; Tarifa Branca.

1 I INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) no Brasil é, em sua maioria, atendido por energia proveniente de hidrelétricas. Porém, ao decorrer dos últimos 10 anos, a geração fotovoltaica vem ganhando grande destaque, devido ao grande potencial de geração solar em contexto nacional.

Do ponto de vista do consumidor, a energia solar é uma alternativa frente ao custos da energia elétrica atualmente no país, e uma forma de investimento a longo prazo. Por outro lado, do ponto de vista da concessionária, é vantajoso pela possibilidade da descentralização da carga.

Uma outra medida adotada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelas concessionárias é a possibilidade de implantação da tarifa branca. Esta medida, possibilita que, nos horários de maior carregamento do sistema da concessionária, consumidores residenciais diminuam seu consumo de energia, diminuindo assim a carga do sistema.

A tarifa branca é uma oportunidade para o consumidor reduzir os custos com a conta de energia. O consumidor pode optar pela tarifa branca e pagar uma taxa menor no período onde o carregamento do sistema da concessionária é menor, horário conhecido como fora ponta, em contrapartida, pagar mais nos horários de maior carregamento do sistema, conhecido como horário de ponta (ANEEL, 2015).

Frente à tal perspectiva, o trabalho propõe um sistema inteligente de gerenciamento de carga do consumidor residencial. O sistema proposto conta com um servidor, um banco de dados para armazenamento de informações dos usuários, um microcontrolador que irá conectar-se à rede Wi-Fi local e enviar informações ao servidor, e uma interface web, com gráficos e informações a respeito do manejo de carga realizado. Além disso, o sistema contará com um método de previsão de geração de energia solar, ou seja, o sistema irá prever quanto a geração distribuída irá gerar na próxima hora, com o intuito de melhorar ainda mais o manejo de energia da residência. Para o consumidor, é interessante conhecer o fluxo de potência em sua residência, com o intuito de saber quando a geração fotovoltaica está suprindo a demanda total da casa, e quando está sendo utilizada energia proveniente da rede da concessionária.

Atualmente, no cenário energético brasileiro, sistemas fotovoltaicos estão tornando-se cada vez mais atrativos economicamente. Tais sistemas possuem vantagens, tanto para o consumidor, quanto para a concessionária. De acordo com Ricardo Benedito (2009), a principal vantagem de sistemas fotovoltaicos conectados à rede para a concessionária

é a possibilidade de gerenciar a demanda de forma descentralizada. No ponto de vista de mercado, segundo Machado (2015), o Brasil é um país privilegiado no contexto de energia fotovoltaica por possuir elevados índices de radiação solar em todo seu território, possuindo uma média anual de 1200 a 2400 kWh/m²/ano.

Visto ao crescente avanço da energia fotovoltaica no Brasil, além da possibilidade da adesão do consumidor residencial à tarifa branca, um sistema capaz de monitorar e tomar decisões torna-se atrativo, pelo fato de ser uma área totalmente inexplorada, com poucos trabalhos englobando esses dois termos em destaque no país. Anesi (2017) afirma que a principal finalidade da criação da tarifa branca é aliviar o sistema elétrico de potência do país nos horários de ponta, portanto, um sistema que faça um manejo consciente de energia torna-se interessante do ponto de vista de consumo.

Além disso, um sistema capaz de prever o montante de energia que o usuário irá gerar na próxima hora pode gerar eficientização de energia elétrica, reeducando os hábitos de gasto de energia do consumidor. Conforme Pires (2016), ferramentas voltadas à geração e à previsão de geração fotovoltaica pode servir de auxílio para a crescente utilização desta forma de energia no país.

Com o avanço dos incentivos para adoção de micro geração em âmbito nacional, estão surgindo no mercado produtos que aliam micro geração distribuída com automação residencial, possibilitando ao usuário destes sistemas o total controle e manejo de energia em sua residência.

O termo automação vêm, gradativamente, tornando-se assunto de estudo e pesquisa no âmbito nacional e mundial. Enquanto que na indústria estão sendo difundidos os conceitos da indústria 4.0, no meio residencial, o consumidor está cada vez mais propenso a investir em automação residencial: a famosa domótica.

No trabalho apresentado por RIBEIRO (2018), é realizado um estudo sobre os benefícios e vantagens de se utilizar automação residencial. O autor propõe um sistema de automação para uma residência tipo *loft*, através de microcontroladores programáveis, cabeamentos, e uma rede de comunicação tipo *Local Area Network* (LAN), com a finalidade de realizar a troca de informações entre os dispositivos. A automação proposta no trabalho foi instalada em “quadros de automação”, que são os sistemas de controle, onde ficam concentrados os microcontroladores responsáveis pela inteligência do sistema de domótica.

Atualmente, com o avanço da internet e com o grau de conectividade e acessibilidade que esta ferramenta oferece aos usuários, o conceito de *inthernet of things* (IOT) em conjunto com a domótica está se difundindo tanto no mercado mundial como no nacional. Redes inteligentes de informação, servidores e bancos de dados estão sendo paulatinamente incorporados no meio residencial, não restringindo-se apenas ao meio industrial.

Desse modo, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma ferramenta que põe em prática os conceitos de geração distribuída em conjunto com tarifa branca, e analisar os resultados práticos através de simulações de carga. Desta forma, é necessário desenvolver

um sistema capaz de medir grandezas como corrente e tensão, geradas pelos painéis fotovoltaicos, bem como medir corrente e tensão provenientes do banco de baterias, e também medir tensão e corrente provenientes da rede da concessionária.

2 | METODOLOGIA

A implantação da tarifa branca juntamente com geração distribuída com banco de baterias pode trazer benefícios financeiros para o usuário do sistema. A metodologia de inserção do sistema proposto no sistema de geração pode ser observado na Fig. 1.

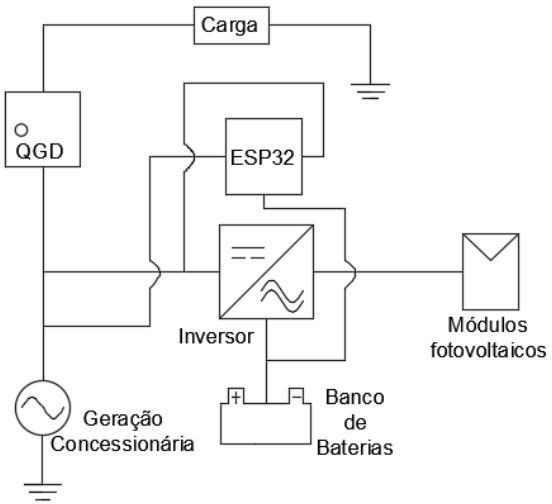


Fig. 1- Sistema de manejo e monitoramento proposto.

Todos os dados coletados instantaneamente são enviados ao servidor, que fica responsável por salvar os dados, e tomar ações de gerenciamento de carga, de acordo com a necessidade energética do usuário e de acordo com a previsão de geração de energia na próxima hora. Esta decisão é enviada ao microcontrolador, sendo que este fica responsável por chavear relés de estado sólido que ficam alocados na geração, no banco de baterias e na rede da concessionária de energia, com o intuito de utilizar a energia elétrica de maneira mais eficiente e reduzir custos.

2.1 Programação do Servidor

Inicialmente foi realizado a programação do servidor. O servidor é responsável por realizar manejo das informações provenientes do microcontrolador, e salvar os dados em um banco de dados.

De acordo com a Fig. 2, existem 4 etapas dentro da programação do servidor. A

elaboração da parte lógica consiste em de que forma o servidor realizará o manejo de carga do usuário através dos relés de estado sólido. A parte lógica do servidor visa reduzir os custos da energia, realizando o manejo da maneira mais rentável possível, de acordo com o horário e com a curva de demanda do consumidor. Todo o projeto foi desenvolvido através do software Sublime Text 3, que é um bloco de notas que suporta programação em Python. O microframework utilizado para programação foi o Flask, que possibilita uma programação baseada em rotas de dados.

O segundo bloco representa a elaboração da comunicação servidor – microcontrolador. O protocolo de comunicação utilizado é o HTTP, protocolo largamente empregado na comunicação de navegadores de internet. O microcontrolador envia uma requisição POST para o servidor com as medições de energia realizadas na residência. Posteriormente, o servidor salva essas informações no banco de dados, e retorna uma resposta ao microcontrolador. Caso o servidor tenha sucesso em salvar os dados no banco de dados, a mensagem enviada de volta ao microcontrolador será “ok”. Caso contrário, a mensagem de resposta será “fail”.

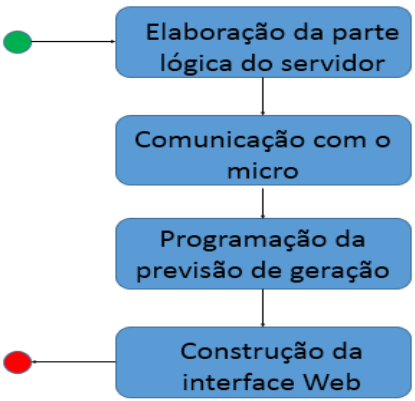


Fig. 2 - Etapas da programação do servidor.

O terceiro bloco representa a programação da previsão de geração. O sistema contará com um mecanismo que possibilita estimar a geração fotovoltaica do usuário com uma hora de antecedência, de acordo com sua localização geográfica, umidade, radiação e temperatura instantâneas. A programação da previsão de geração do sistema é realizada através da lógica empregada no trabalho de Pires (2016), sendo que a potência máxima de um painel fotovoltaico é calculada computacionalmente através de (1), onde a potência máxima de um painel, ($P_{MÁX}$), é dado em função da potência em condições de teste do painel, (P_{STC}), irradiação solar instantânea G_i, irradiação instantânea em condições de teste

G_{STC}, temperatura instantânea T_i, temperatura em condições de teste T_{STC}, e o coeficiente de temperatura γ, que varia de $-0{,}005^oC^{-1}$ a $-0{,}003^oC^{-1}$. O banco de dados contará com dados de geração fotovoltaica tabelados, baseados na temperatura, umidade relativa e radiação solar. Com esse banco de dados, e na temperatura, umidade e radiação solar instantânea, será possível realizar a previsão da geração fotovoltaica para a residência em questão.

$$P_{MÁX} = P_{STC} \times \frac{G_i}{G_{STC}}[1 - \gamma(T_i - T_{STC})] \qquad (1)$$

Por fim, de acordo com o quarto bloco, foi realizada a construção da interface web, na qual apresenta todos os dados referentes às medições realizadas instantaneamente na residência, além de históricos de dados, que podem ser consultados pelo usuário a qualquer momento.

O menu principal conta com três outros menus, que possibilita ao usuário acompanhar o fluxo de potência proveniente do seus sistema de geração distribuída, banco de baterias, e rede da concessionária em tempo real.

A Fig. 3 apresenta a forma como é realizada a comunicação com o microcontrolador e a inserção de dados no sistema, e de que forma o servidor opera.

O primeiro passo é a coleta de dados do microcontrolador. Os dados referentes à corrente proveniente da concessionária, tensão da concessionária, corrente e tensão dos módulos fotovoltaicos, bem como corrente e tensão do banco de baterias são medidos e enviados ao servidor. Posteriormente, o servidor valida se o microcontrolador está registrado no banco de dados, ou seja, se existe um cliente cadastrado na interface web para aquele microcontrolador. Se houver um cadastro no banco de dados, o servidor salva os dados provenientes do usuário e realiza uma previsão do montante de energia os módulos fotovoltaicos poderão gerar daqui a uma hora. Caso não houver um cadastro, o servidor espera o cliente realizar o cadastro do microcontrolador através de um computador ou celular, e posteriormente valida os dados enviados.

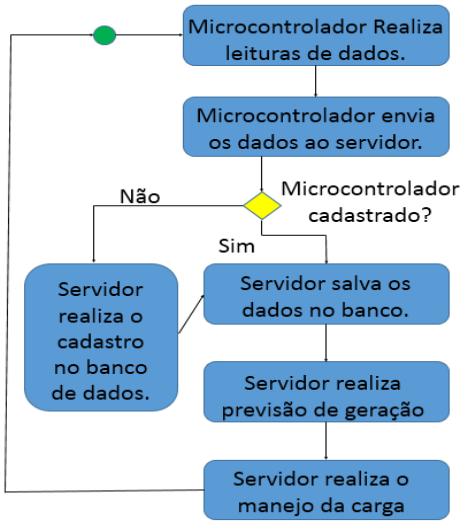


Fig. 3 - Comunicação entre servidor - microcontrolador.

Quanto ao manejo de carga, o servidor seguirá a lógica apresentada nos fluxogramas apresentados nas próximas figuras.

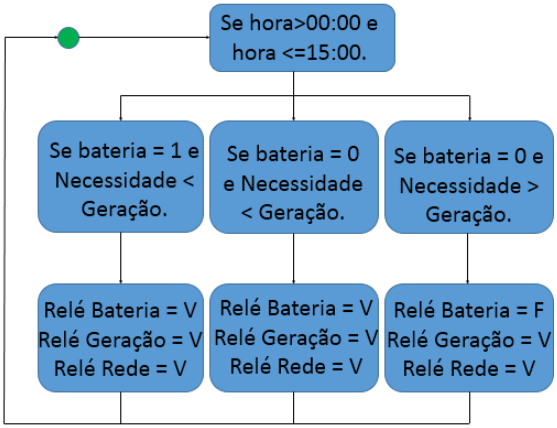


Fig. 4 - Manejo de carga das 00:00 às 15:00.

Conforme a Fig. 4, o elemento comparativo para o servidor realizar o manejo será a bateria: Se a bateria estiver carregada e a necessidade energética do usuário for menor que a geração fotovoltaica, todos os relés serão ligados.

Caso a bateria esteja descarregada e a necessidade for maior que a geração, todos

os relés serão ligados também, de forma a carregar a bateria.

Caso a bateria esteja descarregada, e o cliente necessite de mais energia do que está gerando, é deixado a carga da bateria para depois, e são mantidos ligados os relés da geração e da rede da concessionária, pois a geração da residência não será suficiente para suprir a demanda.

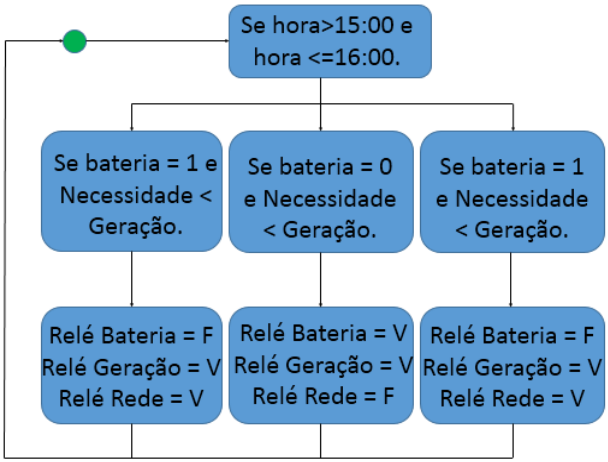


Fig. 5 - Manejo de carga das 15:00 às 16:00.

O manejo de carga das 15:00 até as 16:00 (Fig. 5) será fundamentado no nível da bateria também. Porém, diferente do anterior, porém, neste horário, o sistema tenta carregar o banco de baterias se o mesmo encontra-se descarregado, ou manter ele carregado, para utilizar a sua energia no horário de ponta.

Na faixa de horários da Fig. 6, também é priorizado a carga da bateria. Em todos os casos, não será utilizado energia proveniente das baterias, mesmo que o banco esteja totalmente carregado. Isto garante que as baterias estejam carregadas durante o horário de ponta do SEP.

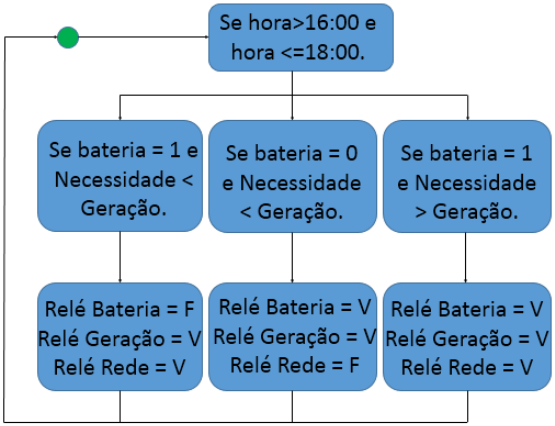


Fig. 6 - Manejo de carga das 16:00 às 18:00.

Por fim, das 18:00 horas até as 00:00 (Fig. 7), o sistema tentará não utilizar energia proveniente da concessionária, através do banco de baterias e da geração fotovoltaica. Desta forma, a energia da concessionária não será utilizada, e o consumidor poderá utilizar a energia proveniente totalmente do banco de baterias e da sua geração.

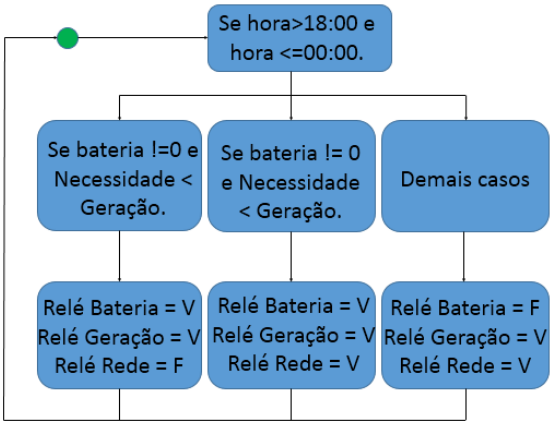


Fig. 7 - Manejo de carga das 18:00 às 00:00.

Após a programação do servidor, o segundo passo consistiu em realizar a programação do microcontrolador, equipamento que ficará responsável pela troca de informações entre o sistema da residência e o servidor.

2.2 Programação do Microcontrolador

A segunda etapa da metodologia proposta, é a programação do microcontrolador. O microcontrolador escolhido para realizar as medições e o gerenciamento de carga do usuário é o ESP32. Este microcontrolador foi escolhido devido à sua versatilidade: ele já apresenta conexão *Wi-Fi* em seu *Chip*, além de possuir um processador extremamente poderoso e veloz. Além disso, o mesmo possui *Bluetooth Low Energy*, o que possibilita a integração com celulares, *tablets*, etc. O diagrama de fluxo da Fig. 8 apresenta o fluxo de ações que serão desenvolvidas na programação do ESP32.

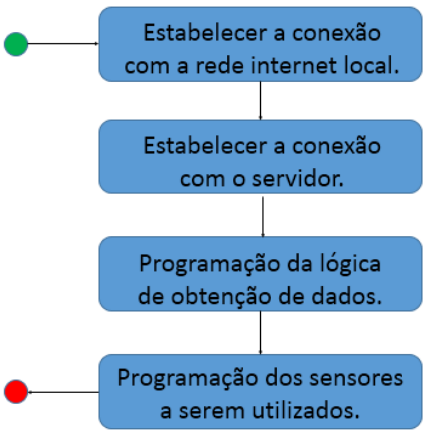


Fig. 8 - Diagrama de fluxo da programação do ESP32.

Logo após a validação da conexão, será desenvolvida a comunicação com o servidor. Como mencionado, a comunicação será realizada através do protocolo HTTP. O microcontrolador ficará responsável por enviar os dados provenientes das medições ao servidor. O microcontrolador enviará os dados através de um JSON, que é um tipo de protocolo de mensagens entre máquinas.

Os dois últimos blocos serão executados em conjunto. A obtenção de dados, referenciada no terceiro bloco, representa a programação referente à obtenção da tensão, corrente e fator de potência da rede elétrica. Basicamente, o microcontrolador ficará responsável por obter dados de 3 fontes: concessionária, banco de baterias e geração fotovoltaica. O esquema de ligação do microcontrolador inserido no circuito da residência está representado na Fig. 1.

De acordo com a Figura 1, o microcontrolador ficará responsável por monitorar a tensão e a corrente em 3 pontos: na geração da concessionária, na saída do inversor, e no

barramento do banco de baterias. Em todos estes pontos, haverá sensores de corrente e tensão, além de 3 atuadores para comutação de carga.

A Fig. 9 representa a forma de comunicação entre o microcontrolador – servidor – banco de dados – usuário.

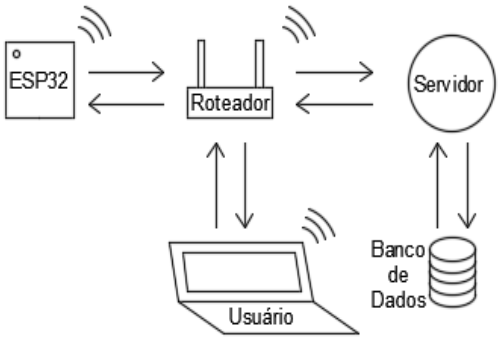


Fig. 9 - Fluxo de informações do sistema proposto.

Conforme a Fig. 9, o fluxo de comunicação entre todos os dispositivos é bidirecional, e o método de comunicação é sem fio. O microcontrolador ficará responsável por coletar os dados e enviá-los ao roteador da casa. O roteador tem a função de realizar a comunicação entre a rede local do usuário com a rede global de internet. Ele realiza a comunicação ESP32 – Servidor, como também a comunicação Cliente – Servidor. O servidor recebe os dados provenientes do roteador da residência, e os salva em um banco de dados. Através da lógica de programação do servidor, o mesmo envia uma resposta ao roteador, e por fim este fica responsável de entregar esta informação ao microcontrolador.

Para validar a metodologia proposta neste trabalho, foram desenvolvidos dois estudos de caso. Neste trabalho, será apresentado o primeiro estudo de caso desenvolvido.

2.3 Circuito Eletrônico

Depois da construção e programação do servidor e do microcontrolador, foi elaborado um circuito eletrônico. O circuito eletrônico foi projetado e validado através do software de simulação Proteus. A Fig. 10 apresenta todos os componentes utilizados para implementação do circuito eletrônico.

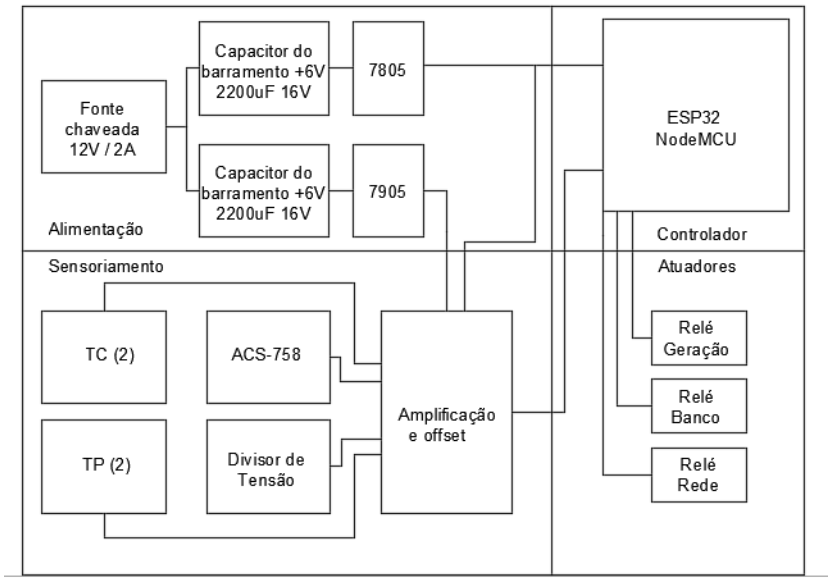


Fig. 10 - Diagrama com os componentes do sistema.

Como pode ser observado na Fig. 10, o circuito é subdividido em alimentação, sensoriamento, controle e atuadores. O circuito de alimentação consiste em uma fonte chaveada de 12V e 2A, capacitores de barramento para criar uma tensão simétrica de 6V. Esta tensão, por sua vez é aplicada a reguladores de tensão, e posteriormente a um filtro de espúrios com capacitores cerâmicos.

A tensão simétrica é necessária para alimentar o circuito de amplificação e *offset*, que consiste em um amplificador operacional TL074, e um amplificador operacional TL072. Todo o projeto de ganho e *offset* dos amplificadores foi realizado através da análise da malha de controle do amplificador, utilizando a metodologia do curto-circuito virtual das entradas. Os sinais aplicados aos amplificadores são provenientes dos sensores utilizados para medição das grandezas elétricas: dois transformadores de corrente e dois transformadores de tensão para a medição de grandezas alternadas, e um ACS758 com buffer de tensão e um sensor de tensão desenvolvido com optoacoplador TIL111, divisor resistivo e buffer de tensão para medição de grandezas contínuas, provenientes do banco de baterias.

Os 6 sinais de tensão são posteriormente enviados ao microcontrolador ESP32, que foi programado em C para manipulação das variáveis envolvidas. Posteriormente, estas informações são enviadas ao servidor, que realiza a lógica de manejo de carga, e devolve a resposta ao microcontrolador instantaneamente.

A informação devolvida ao microcontrolador é utilizada para chavear os relés de estado sólido, de acordo com as Figuras de manejo dos relés, apresentadas anteriormente neste trabalho.

Após a realização do projeto, através de equacionamento de ganho, offset e esforços nos componentes, foi elaborado o circuito eletrônico do sistema proposto. A Fig. 11 apresenta a disposição física dos componentes do circuito eletrônico implementado.

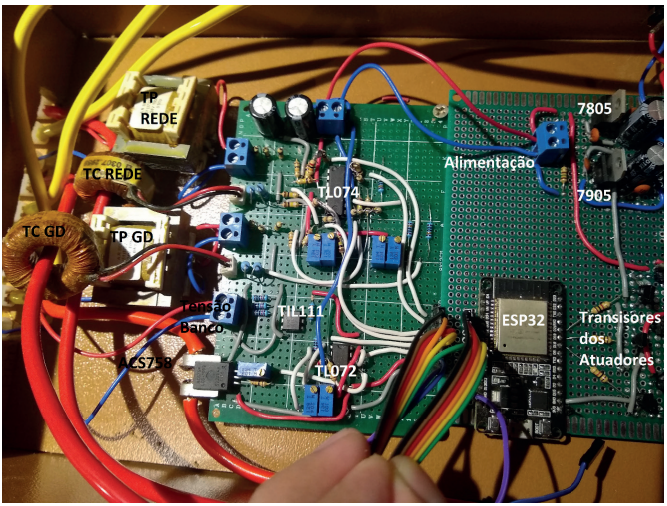


Fig. 11 - Circuito eletrônico implementado.

O circuito foi submetido a 2 tipos de teste: testes de conexão com o servidor e envio de dados, e testes de precisão das medições. O teste de envio de informações apresentou resultados satisfatórios, mostrando que a taxa de transmissão de pacotes entre servidor – microcontrolador foi estabelecida em torno de 0,3 segundos.

Os resultados obtidos no segundo teste, a respeito da precisão do circuito, está representado na Tabela 1.

	TP	TC	Sensor de Tensão DC
Faixa de medição	218V - 230V	2,6A – 8,6A	45,2V - 54 V
Erro máximo	0,176%	1,56%	1,64%

Tabela 1 - Medições práticas realizadas no circuito.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, o erro máximo de medição de tensão para os transformadores de potencial, (em relação à um multímetro profissional Minipa ET-3702A), foi de 0,176%, mostrando que o sistema realmente apresentou precisão na leitura de tensão alternada.

Considerando medições de corrente alternada, o erro máximo registrado foi de 1,56%.

No sensor de tensão que foi utilizado para medições de tensão contínua do banco de baterias, foi registrado um erro de 1,64%. De acordo com esses dados, observa-se que o circuito de sensoriamento proposto apresenta valores precisos de medições em comparação a um modelo comercial de medidor de tensão e corrente.

2.4 Estudo de Caso

O estudo de caso realizado para comprovar a eficácia do funcionamento da metodologia foi baseado em um consumidor residencial que consome um montante de energia superior aos 500kWh ao mês. Foi considerado um banco de baterias de 3kWh, e um arranjo de 15 módulos fotovoltaicos de 250W. A curva de carga do usuário do sistema considerada para o estudo está representada na Fig. 12. Observa-se que nos horários de ponta do sistema é onde ocorre a maior demanda de energia. Através do sistema fotovoltaico e do banco de baterias, o consumo de energia elétrica proveniente da rede de energia da concessionária diminuirá.

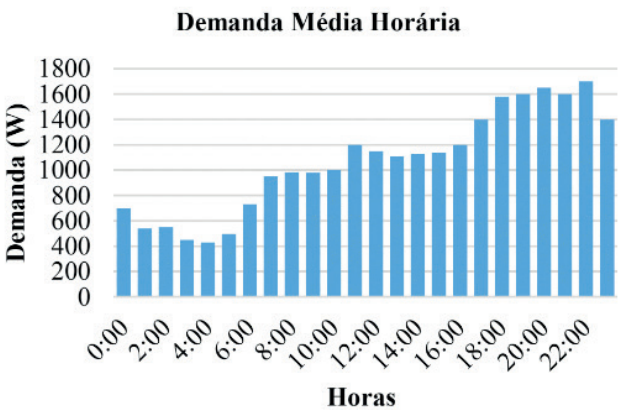


Fig. 12 - Necessidade energética diária.

A carga do banco de baterias (Fig. 13) foi baseada para atender à necessidade energética do consumidor no horário de ponta, horário em que o valor da energia proveniente da concessionária é mais elevado (das 18h às 22h).

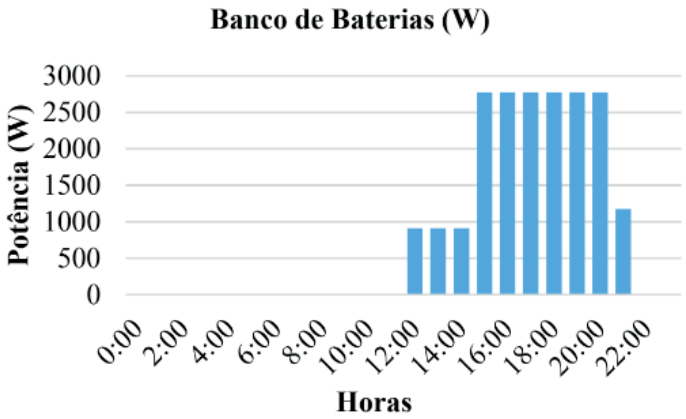


Fig. 13 - Manejo do banco de baterias.

A Fig. 14 mostra o gráfico da potência entregue pela geração distribuída à residência.

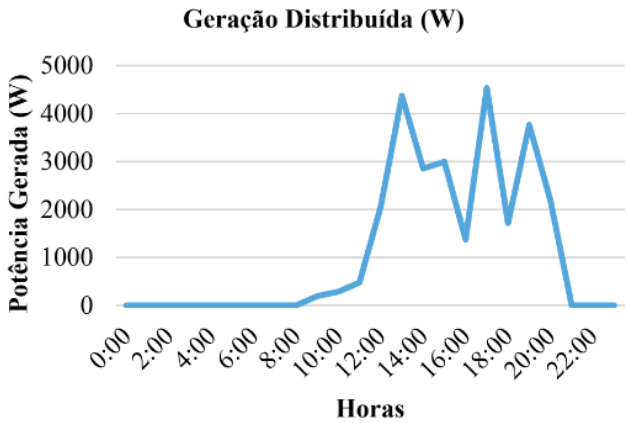


Fig. 14 - Curva de Geração distribuída.

Por fim, tem-se a última curva do sistema: a curva da energia proveniente da concessionária (Fig. 15). Observa-se que com o sistema proposto, o consumo de energia proveniente da rede da concessionária caiu drasticamente, ocasionando uma economia na conta de energia elétrica do cliente referente ao estudo de caso 1.

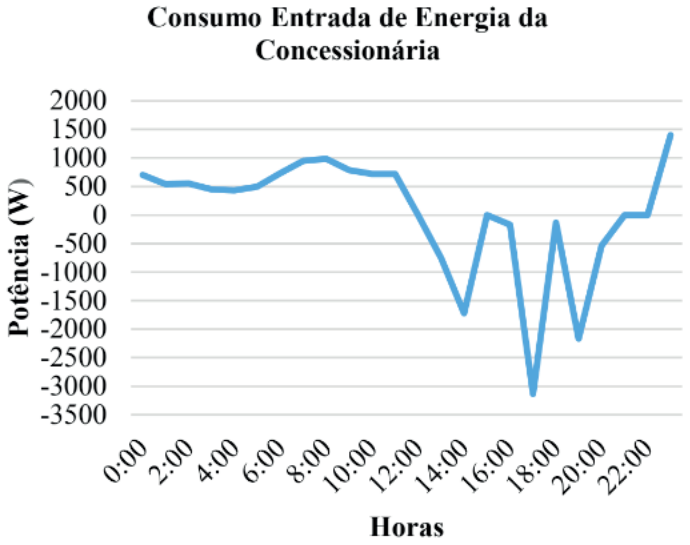


Fig. 15 - Consumo da rede de energia elétrica durante o dia.

Quanto aos valores referentes à previsão de geração, foram utilizados dados de umidade, radiação e temperatura obtidos no dia primeiro de Janeiro de 2016, na localidade de São Martinho da Serra, RS. Com esses dados, realizou-se duas simulações: a primeira, consistiu em calcular o valor da potência entregue pelo sistema do estudo de caso, utilizando os dados de umidade, radiação e temperatura já existentes no banco de dados. A segunda simulação consistiu em enviar os dados horários climatológicos para o servidor, sendo que desta vez ele ficaria encarregado de prever o montante de potência que sistema seria capaz de entregar, considerando uma hora à frente. Em suma, a primeira simulação consiste em um cálculo exato do valor de potência que será gerado pelo sistema, enquanto a segunda simulação é um valor estimado, previsto pelo sistema. A Fig. 16 mostra o comparativo entre os valores calculados e os valores previstos.

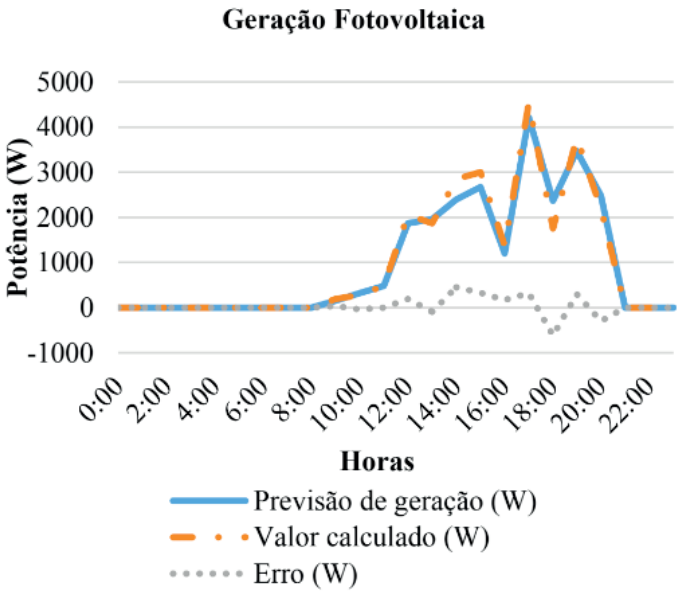


Fig. 16 - Comparativo entre a previsão de geração fotovoltaica e o valor exato.

Através da realização da simulação do sistema durante um dia, pôde-se determinar a economia gerada ao consumidor, se o mesmo adotasse a metodologia proposta, e adotasse a utilização de um banco de baterias (sem considerar os custos de implantação deste sistema). O cenário comparativo proposto conta com os mesmos dados de curvas de demanda e geração, a diferença entre ambos é a utilização de um banco de baterias, e a aplicação da metodologia proposta. A Tabela 2 evidencia as diferenças e semelhanças entre ambos os sistemas.

Sistema 1 (estudo de caso)	Sistema 2
15 módulos fotovoltaicos	15 módulos fotovoltaicos
Banco de baterias de 3kWh	Sem banco de Baterias
Empregando a metodologia de manejo	Sem empregar a metodologia de manejo
Residência adequada à tarifa branca	Residência adequada à tarifa branca

Tabela 2 - Comparativo entre os sistemas.

Foram realizadas simulações considerando-se os dois sistemas, e concluiu-se que o sistema que aplica a metodologia gera economia de energia elétrica ao usuário. A Tabela 3 apresenta uma estimativa de economia que o sistema 1 pode gerar, em comparação

ao sistema 2 com as mesmas curvas de demanda e de geração, porém que não aplica a metodologia proposta no trabalho.

Conforme observado na Tabela 3, o sistema proposto pode gerar uma economia anual de até R$ 509 ao usuário neste estudo de caso.

Economia Diária (R$)	1,41
Economia Mensal (R$)	42,4
Economia Anual (R$)	509

Tabela 3 - Economia gerada pela metodologia proposta.

3 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para gerenciamento de carga de consumidores residenciais com geração distribuída e adaptados à tarifa branca. De acordo com o resultado, a metodologia proposta gerou economia para o usuário do sistema, além de possibilitar um controle de fluxo de potência na residência.

Em relação ao circuito prático, observou-se que os resultados de medições do circuito de sensoriamento foram precisos. Além disso, pôde-se validar o chaveamento de carga com os relés de estado sólido, de acordo com a resposta enviada pelo servidor.

O servidor de obtenção de dados, bem como a interface gráfica elaborada mostraram-se funcionar satisfatoriamente. Foram realizados testes com a interface gráfica com o usuário, mostrando-se responsiva e de fácil interação e compreensão. Todos os dados pertinentes a energia e consumo podem ser visualizados na interface elaborada.

Sistemas de geração fotovoltaica estão tornando-se atrativos economicamente no país, portanto, a partir do momento que houverem maiores incentivos por parte do governo para adoção desta tecnologia, maior será a procura por tecnologias de manejo de carga e automação residencial para sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ANESI, Caroline. Desenvolvimento de Ferramenta para análise de Migração de Consumidores de Baixa Tensão à Tarifa Branca. 2017.

BENEDITO, Ricardo da Silva. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PIRES, Camilla Leimann et al. Metodologia para previsão de carga e geração no horizonte de curtíssimo prazo. 2016.

RIBEIRO, Carlos Eduardo. DOMÓTICA: viabilidade da Automação Residencial. 2018.

SIGAKI, Lucas; LOPES, Luiz Fernando Braga; VIEIRA, Ricardo Bortolo. Automação residencial controlada via rede de internet e integrado com dispositivos móveis. Revista de Pós-Graduação da Faculdade Cidade Verde, v. 3, n. 2, 2017.

Tarifa Branca. ANEEL 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 12 de Ago. de 2019.

CAPÍTULO 8

ESTUDO DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA DE ÚNICO ESTÁGIO COM CONEXÃO DIRETA AO SISTEMA ELÉTRICO TRIFÁSICO

Data de aceite: 01/05/2021

Lucas Taylan Ponte Medeiros
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Paulo Robson Melo de Costa
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Ângelo Marcilio Marques dos Santos
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Leonardo Pires de Sousa Silva
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Denisia de Vasconcelos Mota
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

Adson B. Moreira
Campus Sobral, Universidade Federal do Ceará, Engenharia Elétrica, Sobral-CE

RESUMO: Esse artigo analisa o comportamento de um sistema fotovoltaico (FV) injetando potência na rede elétrica trifásica com filtro indutivo L. Sendo realizado através do conversor trifásico CC-CA. Foi realizada a obtenção dos parâmetros do modelo da célula FV, a partir da ferramenta Solar Module (physical model) / PSIM e implementado o algoritmo perturbe e observe (P&O) para realizar o rastreio do ponto de máxima potência, desconsiderando os fatores de sombreamento. Para esse sistema foi utilizada a topologia de único estágio e analisada as taxas de distorções harmônicas (TDH) para variação de temperatura e irradiação. O Matlab/ Simulink foi utilizado para realizar as simulações e como resultados, tem-se os gráficos e tabelas comparativas que validam o modelo proposto da célula FV com erro de ±0,1%, além de análises da influência direta da temperatura e irradiação em função da potência máxima do sistema com um rendimento entre 97,2% e 99,8%. Finalmente, se analisou as TDHs sob diferentes condições e seus resultados indicaram está dentro dos critérios da norma IEEE-519, menores que 5%, e desempenho do algoritmo P&O que se mostrou eficaz em extrair a máxima potência do sistema.
PALAVRAS - CHAVE: Sistema Solar Fotovoltaico (FV), Topologia de Estágio Único, Qualidade de Energia.

STUDY OF THE SINGLE STAGE PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION SYSTEM WITH DIRECT CONNECTION TO THE THREE-PHASE ELECTRICAL SYSTEM

ABSTRACT: This paper analyzes the behavior of a photovoltaic (PV) system by injecting power into the three-phase main with inductive filter L. Being performed through the three-phase CC-AC converter. The parameters of the FV cell model were obtained from the Solar Module (physical model) / PSIM and the perturb and observe (P&O) algorithm was implemented to perform the maximum power point tracking, disregarding the shading factors. For this system, the single stage topology used and the total harmonic distortion

(THD) analyzed for temperature variation and irradiation were analyzed. Matlab / Simulink was used to carry out the simulations and as results, we have graphs and comparative tables that validate the proposed PV cell model with an error of ± 0.1%, in addition to analyzes of the direct influence of temperature and irradiation on depending on the maximum power of the system with a yield between 97.2% and 99.8%. Finally, the THDs under study under different conditions and their results indicated that they are within the criteria of the IEEE-519 standard, less than 5%, and the performance of the P&O algorithm that proved to be effective in extracting the maximum power from the system.
KEYWORDS: Solar Photovoltaic Solar System (PV), Single Stage Topology, Power Quality.

1 | INTRODUÇÃO

A geração FV de energia ganhou importância como uma fonte alternativa para os desafios energéticos globais. O desenvolvimento e a utilização em larga escala estão associados aos diversos méritos, como longa vida útil, simplicidade de alocação, capacidade de energia para atender aos requisitos de pico de carga e grande mobilidade (Koutroulis, Kalaitzakis e Voulgaris, 2001).

No contexto nacional, o Brasil, alcançou a capacidade instalada de geração FV de 2,4 GW que representa 1,3% da sua matriz energética no ano de 2018. Nesse mesmo período a China que lidera o mundo em potência instalada apresenta 176,1 GW (ABSOLAR, 2019). Segundo IEA-PVPS (2019) os sistemas FV representam cerca de 2,6% da demanda global de eletricidade e 4,3% na Europa.

Dependendo das condições de geração e aplicações dos sistemas FV, a análise e escolha da topologia para a conexão do sistema FV à rede elétrica é fundamental, e proporciona uma melhor eficiência na extração de potência. Segundo Barnes, Balda e Stewart (2012), a dificuldade de escolha dentre diversas topologias decorre das variações operacionais ao longo do tempo, como por exemplo a variação de irradiação e temperatura.

Os algoritmos de rastreamento de máxima potência (MPPT, do inglês: *Maximum Power Point Tracking*) são necessários e essenciais para maximizar a potência de saída do sistema, independente das condições de irradiação e temperatura e caraterísticas elétricas das cargas. Diversas técnicas de MPPT foram propostas por diferentes autores na literatura como em Subudhi e Pradhan (2013), Esram e Chapman (2007) e Femia *et al.* (2005). Neste trabalho, foi adotado o algoritmo P&O que é um método de simples compreensão, boa eficiência e eficaz em rastrear o ponto de máxima potência (MPP, do inglês: *Maximum Power Point*) com precisão.

Este estudo discute o comportamento dos módulos FV, o método de MPPT, a taxa de distorção harmônica (TDH) e o controle do conversor conectado à rede elétrica em que o sistema esteja dentro dos critérios das normas internacionais como IEEE-519 e brasileiras como NBR 16690:2019.

2 | COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Ao longo dos anos, o custo da tecnologia de sistema fotovoltaico vem reduzindo. Segundo Hacke *et al.* (2018) e Teodoresco *et al.* (2011) a tecnologia FV está se tornando a fonte mais apropriada de geração de energia elétrica entre todas as fontes renováveis por se destacar em abundância, livre de poluição, não possuir peças rotativas e, portanto, apresentar menos manutenção.

2.1 Topologia de conexão do sistema FV

Para este trabalho, foi utilizada a estrutura do sistema de geração de energia FV com configuração topologia de único estágio, e com conversor não isolado, apresentado na Fig. 1. Esse sistema dispensa a conversão CC-CC, sendo o conversor CC-CA responsável, por processar a potência entregue pelo sistema e executar o MPPT. Segundo Tsai-Fu (2011) do ponto de vista da eficiência, custo e tamanho do sistema de estágio único e considerando corretamente a faixa operacional de tensão, o sistema apresenta benefícios se comparado a topologia de duplo estágio. Como descrito em Barners, Balda e Stewart (2012), a configuração envolve menos dispositivos, possui rendimento melhor em relação a topologia de dois estágios, permitindo uma eficiência em sua operação na ordem de 4% a 10% a mais que o de dois estágios.

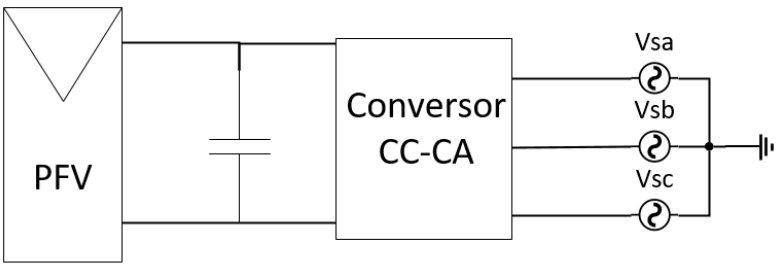


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema FV com topologia de único estágio.

2.2 Modelo elétrico da célula FV

O modelo simplificado de uma célula fotovoltaica (Fig. 1), desprezando suas indutâncias e capacitâncias intrínsecas é apresentado em Roque (2014). Este modelo é utilizado em diversos estudos como em Villalva, Gazoli e Filho (2009), Femia *et al.* (2005), Patel e Agarwal (2008) e foi utilizado nesse trabalho para realizar as simulações e análises, pois apresenta resultados próximos aos modelos mais complexos. O circuito equivalente da célula apresenta uma resistência série, R_s, que representa a soma de várias resistências estruturais, especialmente, dos contatos elétricos e ôhmicos do semicondutor. A resistência

paralela, R_p, é resultante, principalmente, das resistências que surgem da junção p-n com a corrente de fuga dependendo do método de fabricação das células fotovoltaicas (Villalva, Gazoli e Filho, 2009).

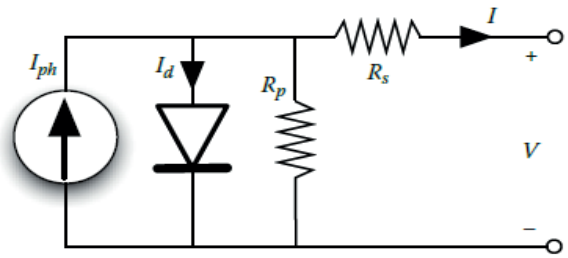


Figura 1 - Modelo equivalente da célula fotovoltaica de diodo único.
Fonte: Femia *et al.* (2005)

A corrente I_{ph} é a corrente fotogerada decorrente da incidência da luz. A corrente I_d é a corrente no diodo característico (intrínseco) da célula fotovoltaica. Assim, a Eq. (1) representa a equação característica, não-linear, da célula fotovoltaica.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_S}{n \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \qquad (1)$$

Em que I_o é a corrente de saturação, V e I são a tensão e corrente de saída nos terminais do módulo, respectivamente, V_t é a tensão térmica da junção p-n e n o fator de idealidade.

De acordo com Femia *et al.* (2013), Rs influencia na inclinação da curva I-V nos níveis de tensão de circuito aberto e na qualidade da célula, ou seja, para valores elevados de R_s, menor é a inclinação da curva o que diminui a qualidade da célula. Por outro lado, R_p atua na inclinação da curva I-V nos níveis de curto circuito, quanto menor o valor de R_p, maior é a corrente que circula pela resistência paralela, reduzindo a corrente efetiva produzida pela célula. Os valores de R_s e R_p podem ser aproximados a partir das Eqs. (2) e (3), respectivamente.

$$R_s \approx -\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V \to Voc} \qquad (2)$$

$$R_p \approx -\left.\frac{dV}{dI}\right|_{I \to Isc} \quad (3)$$

Segundo Tudor, Cotfas e Mihai (2018) a temperatura e irradiância são os fatores que mais afetam o desempenho do sistema FV, e através da Eq. (4) se observa o efeito direto da temperatura na potência máxima gerada pelo módulo FV.

$$P_{max} = P_{max(STC)} \frac{G}{1000}\left[1 + TC(P_{max}, G)(T_c - 25)\right] \quad (4)$$

2.3 Obtenção dos parâmetros

Os módulos fotovoltaicos possuem diversos parâmetros que compõem sua curva característica I-V. Alguns parâmetros são obtidos pelo fabricante e outros a partir de abordagens como proposta por Femia *et al.* (2013), que se baseia na manipulação das curvas I-V e P-V e por Villalva, Gazoli e Filho (2009) que utiliza o método iterativo. A Tab. 1 apresenta as características do módulo fotovoltaico Kyocera KD 210 GX – LPU. A partir da Tab.1 e das curvas do fabricante, foram obtidos os parâmetros elétricos da célula FV, utilizando a ferramenta do modelo físico do módulo FV do *software PSIM*, mostrados na Tab. 2 (PowerSim, 2016).

Parâmetros do Módulo		Valor
N_{cell}	Número de Células	54
D_b	Diodos de *Bypass*	3
P_{max}	Potência máxima	210 W (+5W/-0W)
V_{mpp}	Tensão de máxima potência	26,6 V
I_{mpp}	Corrente de máxima potência	7,9 A
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	33,2 V
I_{sc}	Corrente de curto circuito	8,58 A
a	Coeficiente de temperatura I_{sc}	$-1{,}20.10^{-1}$ V/°C
b	Coeficiente de temperatura V_{oc}	$5{,}15.10^{-3}$ A/°C

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo Kyocera KD 210 GX – LPU para as condições de irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5.

Parâmetros Obtidos		Valor
R_s	Resistência série	0,138 Ω
R_p	Resistência paralelo	3000 Ω
n	Coeficiente de idealidade	1,54

Tabela 2 – Parâmetros obtidos através do ajuste visual da curva com *Software* PSIM.

A Fig. 2 (a) mostra as curvas características retiradas da folha de dados do fabricante I-V para variação de irradiação e com temperatura constante de 25°C. Na Fig. 2 (b) são ilustradas as curvas obtidas I-V a partir da simulação utilizando os parâmetros da Tab. 2. Comparando as curvas, verifica-se as semelhanças no comportamento e valores de grandezas.

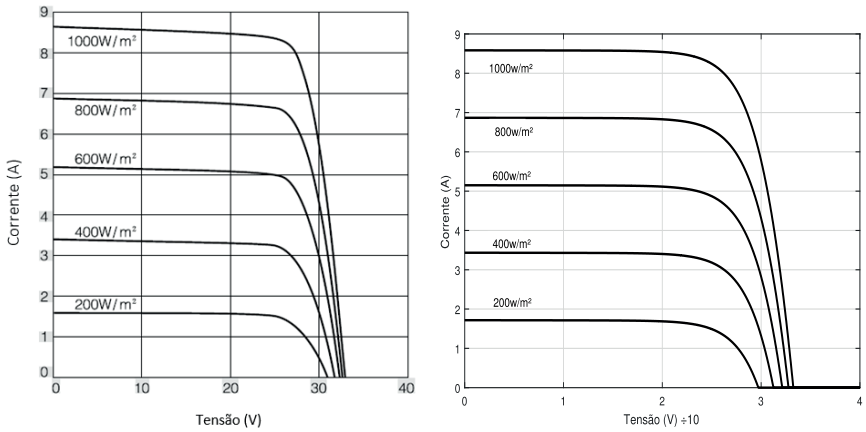


Figura 2 - Curvas características I-V do módulo da Kyocera KD 210 (a) curvas características do fabricante; (b) obtidas a partir de simulação.

A precisão dos parâmetros obtidos também foi estimada numericamente (Tab.3) pela comparação com as especificações dadas pelo fabricante na condição padrão de teste (Em inglês STC – Standard Testing Conditions) e na condição nominal de temperatura na célula FV (Em inglês NOTC – Nominal Operating Cell Temperature), com os valores obtidos na simulação. Observando-se o erro relativo entre os dados do fabricante e os obtidos através da modelagem, percebe-se que o valor varia entre -0,1 e 0,1% e a discrepância pode ser considerada mínima entre os dados de corrente, tensão e potência do sistema FV.

Condições (STC)			
Parâmetros	Dados do Fabricante	Modelo do Matlab	Erro (%)
P_{mpp}	210 W	210 W	0,0
V_{mpp}	26,6 V	26,6 V	0,0
I_{mpp}	7,9 A	7,89 A	-0,1
V_{oc}	33,2 V	33,3 V	-0,1
I_{sc}	8,58	8,58 A	0,0

Condições (NOTC)			
Parâmetros	Dados do Fabricante	Modelo do Matlab	Erro (%)
P_{mpp}	149 W	147,8 W	-0,1
V_{mpp}	23,6 V	23,47 V	-0,1
I_{mpp}	6,32 A	6,30 A	-0,1
V_{oc}	30,0 V	29,9 V	-0,1
I_{sc}	6,62 A	6,95 A	0,1

Tabela 3 – Comparação entre as especificações fornecidas pelo fabricante e as obtidas no *MATLAB* com os parâmetros encontrados no *PSIM* para o módulo Kyocera KD 210 GX – LPU.

2.4 Rastreamento do ponto de máxima potência

A potência gerada pelo módulo fotovoltaico varia em função das condições climáticas que ao longo do dia apresenta variação de radiação solar incidente e de temperatura, modificando a curva de potência I-V do sistema. É natural que se deseje extrair a máxima potência instantânea dos módulos, portanto, a utilização de uma técnica de MPPT que ajusta o ponto de operação do sistema às diversas condições de operação obtendo uma maximização no seu rendimento.

Vários métodos podem ser aplicados para se obter o ponto de máxima potência. De acordo com Femia *et al.* (2013), esses métodos diferem em vários aspectos, como a necessidade de sensores, custo, complexidade, eficácia, entre outros. A dificuldade encontrada pelos algoritmos de busca é a presença de múltiplos MPP, isto é, quando o sistema está sujeito às condições de operação não uniformes, ou seja, diferenças físicas de módulos, falhas de módulos, presença de sombreamento, os algoritmos convencionais não são eficientes. Em razão dessa realidade, serão apresentadas situações em que os sistemas fotovoltaicos apresentem apenas um MPP.

A Fig. 3 mostra a lógica do algoritmo P&O, este método compara a potência fornecida anteriormente com a potência obtida após a perturbação, injetando uma variação de forma periódica na tensão do módulo FV em torno do MPP segundo Tapakis e Charalambides (2014). Ou seja, se a potência aumentar, a aplicação da perturbação é no mesmo sentido para o próximo passo do algoritmo. Caso a potência diminua, o próximo passo do algoritmo é perturbar o sistema no sentido oposto.

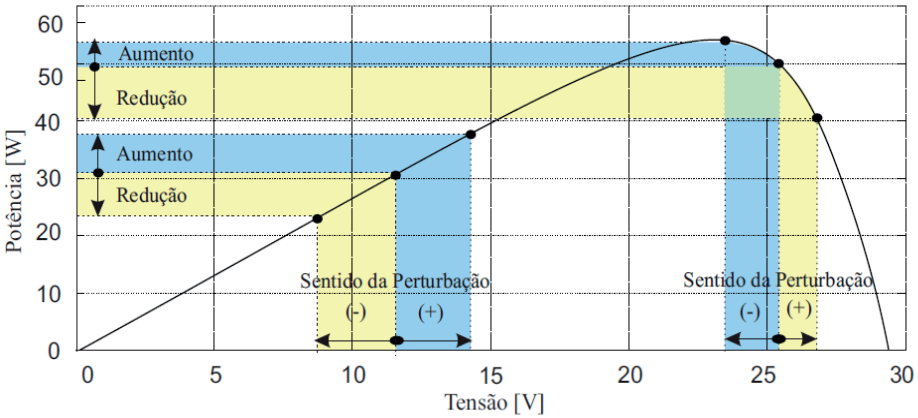


Figura 3 - Lógica de funcionamento do algoritmo P&O.

3 I MODELAGEM E PROJETO DE CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE ELÉTRICA

A Fig. 4 ilustra o esquemático do controle do conversor do lado da rede elétrica que de acordo com Martins (2017), apresenta diversas funções e dentre elas, realizar o controle das potências ativa e reativa entregues à rede elétrica.

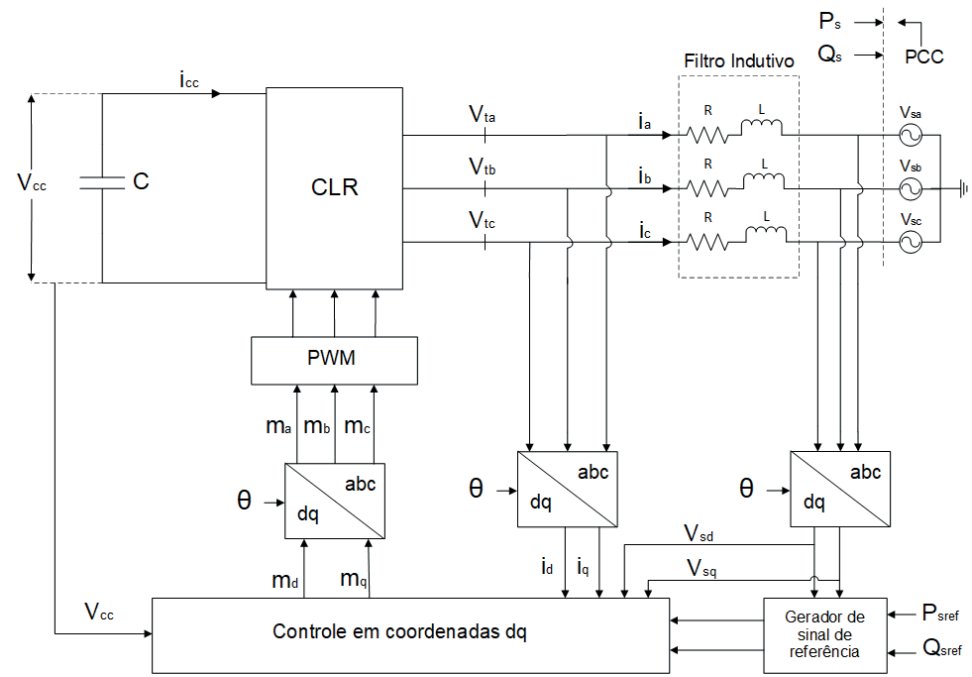


Figura 4 - Modelo esquemático do controle de potência ativa e reativa.

Fonte: Adaptada de Yazidani e Iravani (2010).

Para projetar o controle do conversor eletrônico e analisar a sua dinâmica é necessário realizar o equacionamento do sistema. Para tal, se desenvolveu o modelo dinâmico utilizando a estratégia de coordenadas d-q (de eixo direto e em quadratura), definido por Yazidani e Iravani (2010). As Eqs. (4) e (5) representam o modelo matemático do sistema elétrico em coordenadas d-q, apresentando um sistema com duas variáveis em quadratura que assumem formas de onda contínuas no estado estacionário. O sistema em coordenadas d-q se torna menos complexo e facilita a análise e o projeto de controle.

$$L\frac{d}{dt}\cdot I_d = V_{td} - R\cdot I_d + L\omega I_q - V_{sd} \tag{4}$$

$$L\frac{d}{dt}\cdot I_q = V_{tq} - R\cdot I_q + L\omega I_d - V_{sq} \tag{5}$$

Em que V_{sd} e V_{sq} são as tensões nos terminais do conversor em coordenadas d-q, I_q e I_d as correntes geradas pelo conversor em d-q. Cada fase é conectada ao sistema por uma impedância série, RL, que representa o filtro indutivo, sendo L a indutância e R a sua resistência elétrica e ω é a velocidade angular.

O controle de corrente do conversor é realizado através da Eqs. (4) e (5) e influenciam diretamente no controle das potências ativas e reativas, entregues e absorvidas ao sistema CA como mostrado nas Eqs. (6) e (7), obtendo o controle de modo independente das potências ativa, P_s, e reativa, Q_s. O diagrama de blocos do controle de corrente do conversor eletrônico do lado da rede elétrica é ilustrado na Fig. 5.

$$I_d = \frac{2}{3\cdot V_{sd}}\cdot P_s \tag{6}$$

$$I_q = -\frac{2}{3\cdot V_{sd}}\cdot Q_s \tag{7}$$

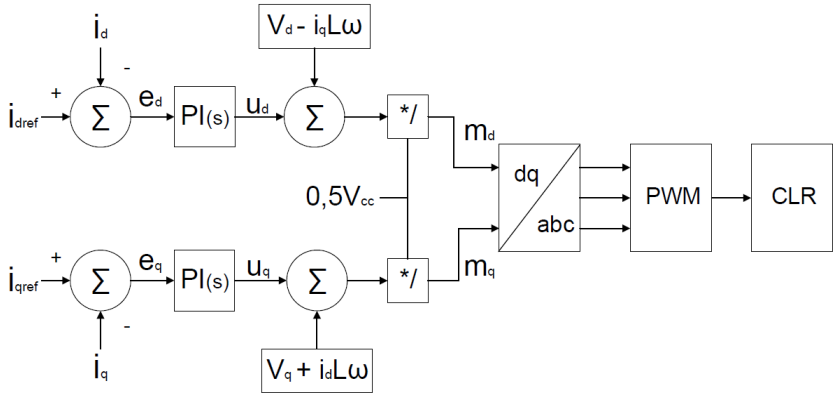


Figura 5 – Esquema de controle de corrente do conversor do lado da rede elétrica em que I_{qref} e I_{dref} são as referências das correntes I_d e I_q.

Para regular a tensão do barramento CC é empregado o mecanismo de realimentação que compara a tensão medida nos terminais do barramento CC (V_{cc}) com a tensão de saída obtida a partir do algoritmo de rastreio de máxima potência (V_{ccref}), ilustrado pela Fig. 6. O controle de tensão do barramento tem o objetivo de transferir a máxima potência do lado CC para o lado CA. Segundo Suebkinorn e Neammanne (2011) o conversor pode operar em dois modos: atuar como retificador, em que a tensão do barramento é inferior e o conversor atua elevando a tensão com auxílio da rede elétrica e pode atuar como inversor, quando a potência gerada pelo sistema fotovoltaico estiver elevando a tensão do barramento.

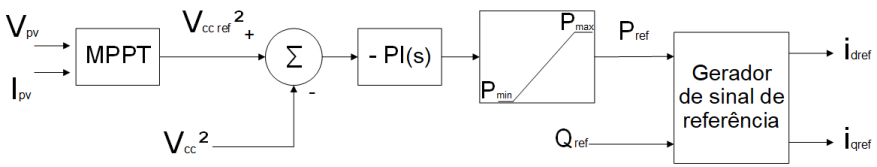


Figura 6 – Representação do diagrama de blocos do controle de tensão do barramento CC.

4 I RESULTADOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

A análise de estratégia de controle do sistema de geração fotovoltaico com topologia de estágio único conectado à rede elétrica trifásica é ilustrada no diagrama de blocos na Fig. 7. O sistema foi simulado na plataforma Matlab/Simulink/Simpowersystems e foram utilizados outros parâmetros apresentados em Tab. 4. Foram utilizados 15 módulos fotovoltaicos associados em série para alcançar os valores de tensão para a faixa de

operação do sistema, necessária para a conexão da topologia de único estágio.

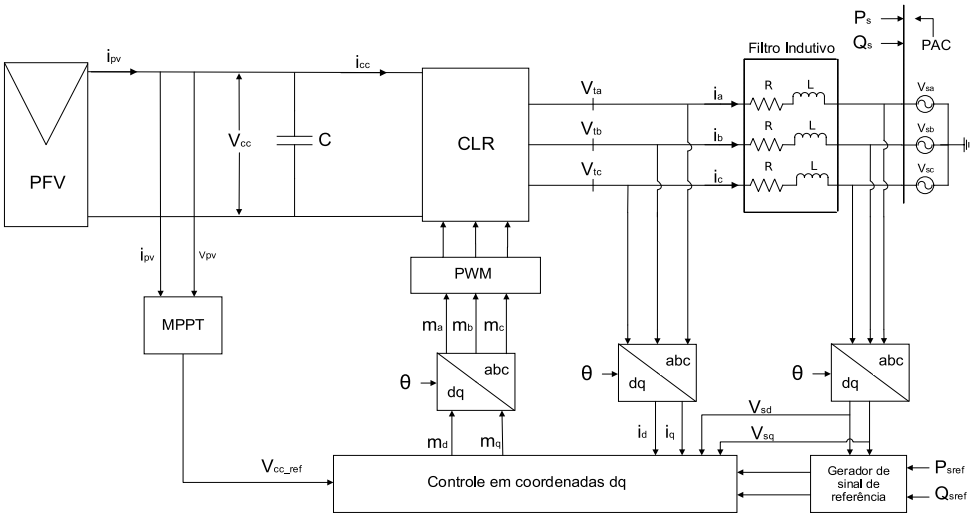


Figura 7 – Sistema de geração fotovoltaica completo.

Fonte: elaboração própria.

Parâmetros		Valores
V_p	Tensão de pico	180 V
V_l	Tensão de linha	110 V
f_{req}	Frequência da rede elétrica	60 Hz
C	Capacitância do barramento	900 μF
V_{cc}	Tensão do barramento	400 V
L	Indutância	7,5 mH
R	Resistência elétrica da indutância	0,31 Ω
f_s	Frequência de chaveamento	24 kHz
R_L	Resistência de pré-carga	5 Ω

Tabela 4 – Parâmetros do sistema utilizados para simulação.

A Taxa de Distorção Harmônica (TDH) da corrente foi analisada para STC e na NOTC. Observou que para uma baixa irradiação a TDH aumentou, porém, os valores de TDH da corrente da rede estão dentro dos limites e recomendações do padrão do IEEE-519, que recomenda níveis de TDH menor que 5%.

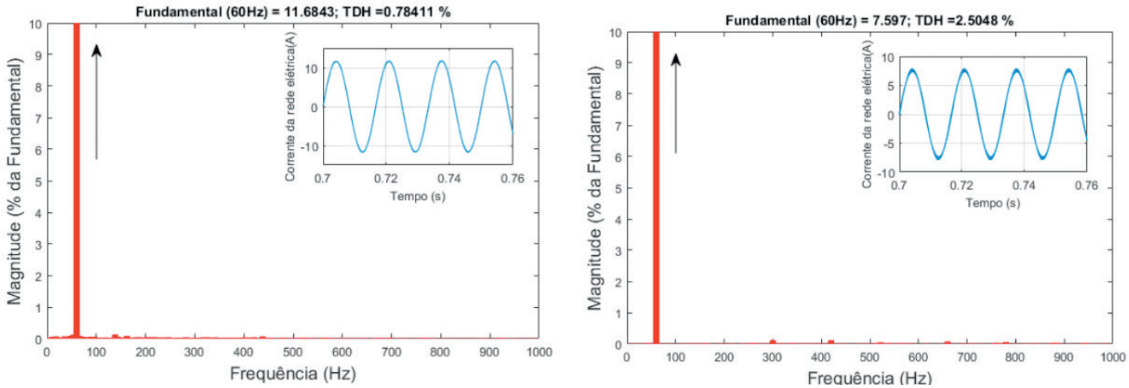


Figura 8 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica. (a) STC; (b) NOTC.

Outro fator relevante a ser analisado é o fator de potência do sistema. A Fig. 9 mostra que I_a e V_a nos terminais do conversor estão em fase para as duas condições de irradiação 1000W/m² e 800W/m². Portanto, com a corrente I_q igual a zero a potência reativa também é nula e o fator de potência é unitário.

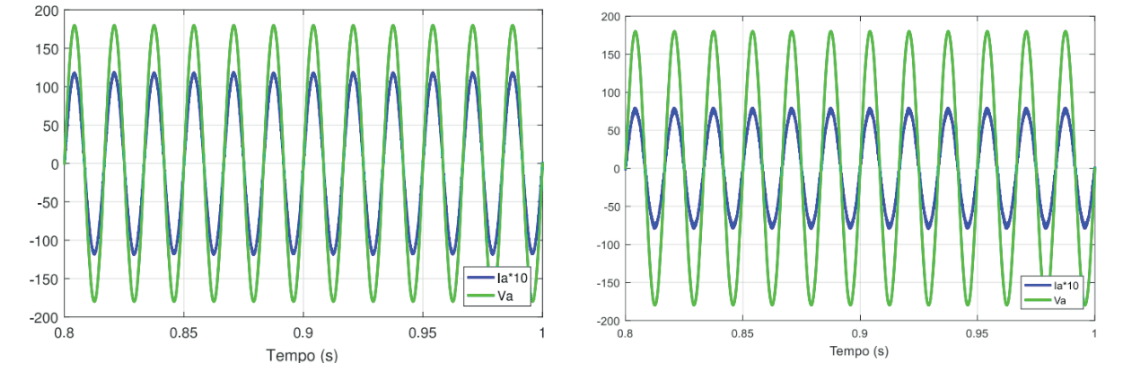


Figura 9 – V_a x I_a. (a) para irradiação de 1000W/m² e temperatura de 25 °C; (b) para irradiação de 800W/m² e temperatura de 49,7 °C.

Sob as condições de temperatura e irradiação, observa-se a resposta do controle da tensão do barramento CC. O controle é feito em dois estágios, inicialmente a tensão V_{cc} segue a referência pré-definida pela tensão de circuito aberto do arranjo dos módulos fotovoltaicos. As Figs. 10a e 10b ilustram em detalhes o comportamento do controle da tensão do barramento CC, em que a V_{cc} segue a referência V_{ccref}. No instante entre 0s e 0,1s os controles estão desativados e as correntes elétricas são limitadas pelos resistores de pré-carga, R_L, para evitar danos ao sistema no período que a tensão é elevada até o valor de referência.

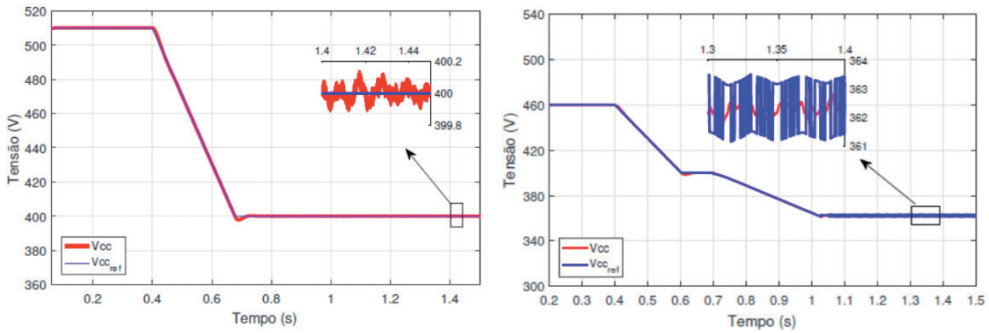


Figura 10 – Comportamento do barramento CC sem algoritmo P&O, (a) condições STC e (b) condições NOTC.

No instante de tempo 0.4s o controle de tensão é ativado e a tensão do barramento segue para tensão de referência V_{ccref} e o processo se repete para as duas condições.

As Figs. 11a e 11b ilustram as curvas da potência e se observa que para tais condições o sistema FV não garante a máxima potência mesmo com uma referência inicial teórica sendo calculada para se aproximar da potência máxima dada pelo fabricante.

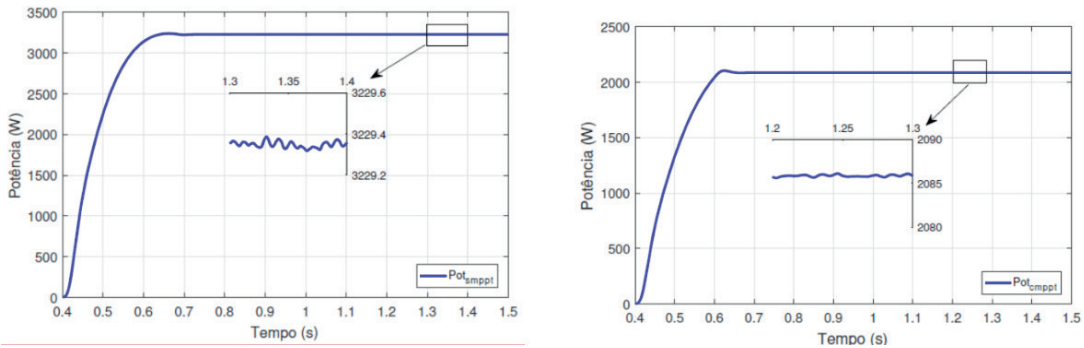


Figura 11 – Comportamento da Potência sem algoritmo P&O, (a) condições STC e (b) condições NOTC.

No momento em que a tensão se estabiliza na tensão de referência, o algoritmo P&O é acionado e a potência se eleva para muito próximo da potência máxima teórica como ilustrado pela Fig. 12. Ao comparar as Figs. (11) e (12) se observa um melhor desempenho com a aplicação do método e um ganho de potência ativa injetada na rede.

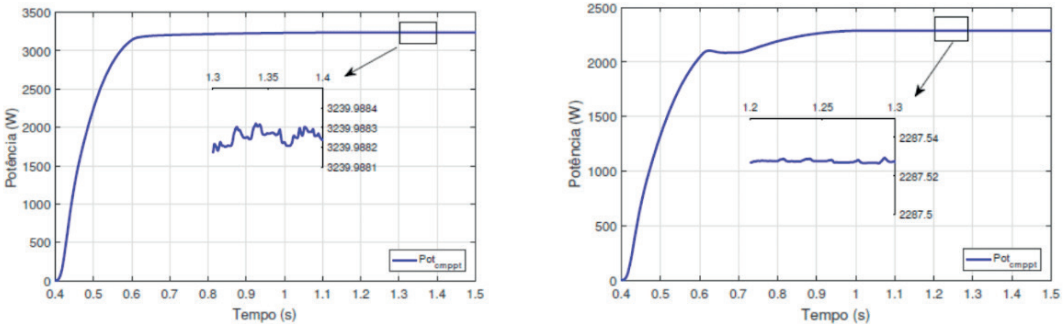


Figura 11 – Comportamento da Potência com algoritmo P&O, (a) condições STC e (b) condições NOTC.

Através da análise do comportamento do sistema sob temperaturas e irradiâncias propostas, foram analisados os rendimentos e as TDHs de corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema observados na Tab. 5. Percebe-se pelos resultados obtidos, que a variação de irradiação apresenta maior influência na corrente e a variação de temperatura maior influência na tensão. Além disso, como descrito em Tudor, Cotfas e Mihai (2018), se observa uma grande influência da temperatura na potência máxima gerada nos módulos FV. Finalmente, a partir do rendimento que apresenta variação entre 97,2% e 99,8%, se observa uma pequena queda de potência enviada para rede elétrica a partir da topologia de único estágio.

	G [W/m²]	V_{pv} [V]	I_{pv} [V]	P_{pv} [W]	P_{rede} [W]	R_{end} [%]	TDH [%]
T = 298 K (25°C)	1200	412	9,5	3915	3834	0,978	0,60
	1000	410	7,9	3240	3200	0,989	0,72
	800	405	6,3	2566	2511	0,979	0,89
	600	400	4,7	1894	1890	0,998	1,19
	T [°C]	V_{pv} [V]	I_{pv} [V]	P_{pv} [W]	P_{rede} [W]	R_{end} [%]	TDH [%]
G = 1000 W/m²	20	419	7,9	3315	3240	0,977	0,70
	45	372	7,89	2935	2875	0,980	0,78
	65	336	7,86	2640	2619	0,992	1,41
	75	317	7,85	2490	2457	0,987	1,65

Tabela 4 – Parâmetros do sistema utilizados para simulação.

5 I CONCLUSÃO

O trabalho analisa a operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, a partir da topologia de estágio único, utilizando a técnica de rastreio de máxima potência com

algoritmo P&O para obtenção da máxima potência do sistema, evidenciando a necessidade do algoritmo para aumentar o desempenho nos sistemas de geração fotovoltaica.

Dependendo das condições de geração e aplicações dos sistemas FV, a escolha da topologia para a conexão do sistema à rede elétrica é fundamental, e proporciona uma melhor eficiência na extração de potência, logo o sistema de topologia de único estágio apresentou um alto rendimento para essa aplicação dentre as variáveis analisadas.

A estratégia de controle proposta é composta por duas malhas em cascata: uma malha de controle de corrente gerada pelo conversor e uma para o controle do barramento CC. Ao serem analisados os resultados obtidos com a implementação dos controladores do sistema a partir da estratégia em coordenada d-q, projetados a partir do método de resposta em frequência, apresentou um bom desempenho no comportamento dinâmico do sistema.

Além disso, verifica-se que os resultados de TDHs estiveram dentro dos critérios, como orientado pela norma do IEEE-519 sobre os limites máximos de injeção de harmônicos na rede elétrica pelo consumidor, no ponto de acoplamento comum, que recomenda níveis inferiores à 5%. Outra variável importante analisada, foi o fator de potência do sistema FV que deve estar entre 0,92 e 1,00 indutivo e 0,92 e 1,00 capacitivo a segundo norma do módulo 8 de 2018 do PRODIST.

Foram analisadas as influências da variação da temperatura que apresenta uma maior influência na tensão e nas TDHs do sistema. Por outro lado, observou-se que a irradiação afeta principalmente na corrente do sistema FV. Além disso, constatou-se o quanto essas variáveis afetam na potência máxima gerada pelo sistema.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Infográfico ABSOLAR. 2019. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>. Acesso em: 25 nov. 2019.

A. K. Barnes, J. C. Balda and C. M. Stewart, “Selection of converter topologies for distributed energy resources,” *2012*

Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, 2012, pp. 1418-1423.

B. Subudhi and R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic

Power Systems,” in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, Jan. 2013.

Daniel Tudor Cotfas, Petru Adrian Cotfas, and Octavian Mihai Machidon, “Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells,” International Journal of Photoenergy, vol. 2018, Article ID 5945602, 12 pages, 2018.

E. Koutroulis, K. Kalaitzakis and N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, Jan. 2001.

Hacke, Peter, Lokanath, Sumanth, Williams, Paul, Vasan, Arvind, Sochor, Paul, TamizhMani, GovindaSamy,

Shinohara, Hirofumi, Kurtz, Sarah, 2018. A status review of photovoltaic power conversion equipment reliability, safety, and quality assurance protocols. Renew. Sustain. Energy Rev. 82 (1), 1097–1112.

H. Patel and V. Agarwal, “MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics,” in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008.

IEA-PVPS. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. IEA-PVPS. 2019. Disponível em: <http://www.iea-pvps.org/ >. Acesso em: 25 nov. 2019.

M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, “Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays,” 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, 2009, pp. 1244-1254.

MOREIRA, A. B. Propostas de controle de um sistema de geraçãode energia elétrica a partir de energia eólica com gerador de indução duplamente alimentado com mitigação de correntes harmônicas na rede elétrica geradas por carga não linear.2017. 156 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, July 2005.

POWERSIM. PSIM tutorial: How to use solar model physical model. 2016. Disponível em: <https://powersimtech.com/drive/uploads/2016/04/Tutorial-Solar-Module-physical-model.pdf>.

R. D. Tapakis, A. G. Charalambides, “Performance evaluation of a photovoltaic park in Cyprus using irradiance sensors”, Journal of Power Technologies, vol. 94, no. 4, pp. 296-305, 2014.

Teodorescu, R., Liserre, M., Rodriguez, P., 2011. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems, vol. 29 John Wiley & Sons.

T. Esram and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.

CAPÍTULO 9

ESTUDO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Data de aceite: 01/05/2021

André Favetta
(FHO | Fundação Hermínio Ometto)
http://lattes.cnpq.br/1729555107293893

Daniel Augusto Pagi Ferreira
(FHO | Fundação Hermínio Ometto)
http://lattes.cnpq.br/1526589803122442

Maurício José Bordon
(FHO | Fundação Hermínio Ometto)
http://lattes.cnpq.br/7915640635397001

RESUMO: Os impactos ambientais causados pela utilização de combustíveis fósseis na geração de energia em nosso planeta estão fazendo com que se busque novas alternativas para a geração com menor agressão ao meio ambiente. Dentre as alternativas existentes a geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos vem ganhando importância global, visto que o sol é a principal fonte de energia em nosso planeta. A geração de energia fotovoltaica é talvez uma das mais promissoras quando se trata de energia renovável e capaz de produzir economia nas faturas de energia para os consumidores finais. Diante disso, o objetivo deste trabalho é determinar dentre cinco tecnologias comerciais de painéis fotovoltaicos o melhor modelo a ser implantado num sistema de minigeração de energia elétrica em uma instituição de ensino superior (IES), de forma a economizar na fatura de energia elétrica e contribuir com a sustentabilidade do planeta. O presente trabalho foi realizado através de pesquisas sobre as tecnologias existentes de painéis fotovoltaicos comerciais, *softwares* de dimensionamentos e métodos de análise de viabilidade financeira. O resultado obtido foi a escolha de um painel que, dentre os estudados, proporcionou uma maior geração de energia, um menor custo de implantação, melhor viabilidade financeira e a contribuição ambiental esperado de sistemas fotovoltaicos.
PALAVRAS - CHAVE: Energia fotovoltaica, Módulo fotovoltaico, Célula fotovoltaica.

ABSTRACT: The environmental impacts caused using fossil fuels for power generation on our planet are causing the search for less aggressive new alternatives. Among the existing alternatives, the power generation through photovoltaic panels has been gaining global importance since the sun is the main source of energy on our planet. The generation of photovoltaic energy is perhaps one of the most promising when it comes to renewable energy and it can reduce costs in energy bills. Therefore, the purpose of this article is to determine among five commercial technologies of photovoltaic panels, the best model to be deployed in a solar mini-generation system for a higher education institution, aiming at the economy energy bills and the contribution to the sustainability of the planet. This work was carried out through research on the existing technologies of commercial photovoltaic panels, sizing software and methods of financial viability analysis. The result obtained was the choice of a panel that, among those studied, provided greater

power generation, lower cost of deployment, better financial viability and the environmental contribution expected by photovoltaic systems.
KEYWORDS: Photovoltaic energy, Photovoltaic module, Photovoltaic cell.

1 | INTRODUÇÃO

Com o aumento acelerado da demanda de energia elétrica no mundo, a necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem, têm levado a busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade (VILLALVA, 2015).

O aproveitamento da energia gerada pelo sol, fonte inesgotável na Terra, tanto como fonte de calor quanto de luz, hoje é uma das alternativas energéticas mais promissoras para fornecer a energia necessária ao desenvolvimento humano. Deve-se lembrar que o sol é responsável pelo nascimento de praticamente todas as fontes de energia na Terra (CRESESB, 2014).

Diferente dos sistemas de produção de energia solar térmica, os fotovoltaicos captam a luz solar diretamente e produzem tensão e corrente, logo, potência. Essa potência elétrica é direcionada para baterias que armazenam energia fornecida no período de luz. Ainda, a potência pode ser direcionada para a rede elétrica, e gerar créditos de energia injetada na rede. Isso contribuiu para que a adoção/utilização da energia solar fotovoltaica sofresse um aumento considerável em todo o mundo. (VILLALVA, 2015).

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste trabalho é comparar as tecnologias dos módulos fotovoltaicos, definindo a mais viável a ser implantada em uma instituição de ensino superior (IES). Para isso é necessário que a revisão bibliográfica aborde os conceitos de energia fotovoltaica, os benefícios que ela proporciona, a influência que a temperatura e a radiação exercem sobre os módulos fotovoltaicos, e as tecnologias disponíveis no mercado.

2.1 Energia solar fotovoltaica

Energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade. O efeito fotovoltaico relatado por Edmond Becquerel, em 1839, provoca uma diferença de potencial nos terminais de uma célula de material semicondutor motivada por absorção de luz. (CRESESB, 2014).

A energia solar fotovoltaica possui a facilidade de poder ser utilizada em todo o território brasileiro, já que o país tem o privilégio de conter elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões. Com as dimensões territoriais e as altas taxas de irradiação solar, é plausível esperar que o Brasil venha a possuir geração fotovoltaica com potencial ao menos dez vezes maior que a Alemanha atualmente (VILLALVA, 2015).

2.2 Benefícios financeiros

A criação da Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012, trouxe benefícios financeiros aos brasileiros usuários do sistema elétrico que, por sua vez, construíssem em suas propriedades uma microgeração distribuída com potência instalada menor ou igual a 75kW, ou uma minigeração distribuída com potência instalada maior que 75kW e menor ou igual a 3MW de energia vinda de fontes renováveis. (ANEEL, 2012).

A Resolução Normativa 482 de 2012, atualizada posteriormente pela Resolução Normativa 687 de 24 de novembro de 2015, proporcionou ao consumidor gerador de energia fotovoltaica, o benefício de injetar na rede da distribuidora a energia ativa que não estiver sendo consumida. Essa energia é cedida como empréstimo e gerará créditos a serem utilizados em até 60 meses pelo consumidor (ANEEL, 2015).

2.3 Radiação solar

A energia do sol é transmitida ao planeta em forma de radiação eletromagnética através do espaço, composta por ondas eletromagnéticas de comprimento de onda e frequências diferentes. A energia transmitida por uma onda está associada à sua frequência, ou seja, quanto maior a frequência, maior também será a energia transmitida (VILLALVA, 2015).

Considerando a radiação solar que chega à Terra incidindo sobre uma superfície para geração de energia, verifica-se que essa radiação é constituída por uma componente direta e outra difusa. Se a superfície estiver inclinada em relação ao horizonte, ocorrerá também uma terceira componente, que será refletida pelo ambiente do entorno, intitulado de “albedo” (CRESESB, 2014).

Uma nova tecnologia de painéis fotovoltaicos capta essa energia refletida através do albedo e potencializam a geração de energia elétrica. Esses painéis são conhecidos como bifaciais pois, possuem células fotovoltaicas em ambos os lados do painel.

2.3.1 Irradiância

A irradiância, ou irradiação, é a grandeza que quantifica a radiação solar, sendo expressa em W/m² (Watt por metro quadrado). Essa grandeza é útil na avaliação de eficiência das células e módulos fotovoltaicos, uma vez que a indústria fotovoltaica adotou como valor padrão 1000W/m². (VILLALVA, 2015).

2.3.2 Influência da radiação e temperatura nos painéis fotovoltaicos

Para que o módulo fotovoltaico gere energia elétrica, é necessário que a radiação solar incida sobre suas células. A máxima potência que um módulo fotovoltaico pode fornecer, varia proporcionalmente com a irradiância recebida: quanto menor a irradiância, menor será a potência fornecida pelo módulo. A temperatura do módulo influencia na tensão fornecida por ele e, por consequência, na potência fornecida (VILLALVA, 2015).

2.4 Células fotovoltaicas

Segundo Ely e Swart (2014), existem três gerações de células solares fotovoltaica. A primeira geração é correspondente ao silício cristalino (c-Si) que, por sua vez, é dividida em duas cadeias produtivas: a de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si). A segunda geração é baseada nos filmes finos inorgânicos como o telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e silício amorfo (a-Si).

As próximas subseções apresentarão maiores detalhes das gerações e tecnologias de células fotovoltaicas.

2.4.1 Células fotovoltaicas de primeira geração

O silício monocristalino (m-Si) é produzido utilizando silício ultrapuro aquecido em altas temperaturas e passado por um processo de formação de cristal, sendo o produto desse processo um lingote de m-Si com uma única estrutura cristalina. A célula de m-Si são as mais eficientes disponíveis comercialmente com eficiências de 14% a 18% (VILLALVA, 2015).

O lingote de silício policristalino (p-Si) é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com diferentes tamanhos e orientações. Diferentemente do m-Si, o p-Si não tem aparência homogênea nem brilhante, e suas células podem apresentar manchas em sua pigmentação (VILLALVA, 2015).

Essas células possuem eficiências entre 13% e 15%, ligeiramente inferior às monocristalinas (PINHO e GALDINO, 2014).

2.4.2 Células fotovoltaicas de segunda geração

Os filmes finos são uma tecnologia recente que, diferentemente das células cristalinas, são fabricados pela deposição de finas camadas de silício sobre uma base. Apesar do custo relativamente baixo, esses dispositivos de filmes finos têm baixa eficiência em relação as tecnologias cristalinas, (entre 7,9% e 9,5%). Normalmente esses painéis são encontrados no mercado com potências que variam de 50W a 110W (VILLALVA, 2015).

3 I METODOLOGIA

Para determinar a extensão do parque gerador necessário, foi dado início a pesquisa em datasheets de painéis fotovoltaicos para selecionar os que melhores se aplicam ao sistema. Realizou-se o levantamento dos dados solarimétricos, geográficos, e energéticos do local, visando atender a necessidade de demanda de consumo em uma IES.

Os dados energéticos foram coletados entre os anos de 2018 e 2019 em um período de 12 meses. Por se tratar de uma instituição de ensino há de se salientar a ocorrência de

sazonalidade no consumo de energia durante o ano devido ao período de férias, que foi constatada durante o estudo das faturas de energia elétrica da IES.

Como forma de auxílio nos estudos, utilizou-se o software para projetos de sistemas fotovoltaicos PVsyst de origem suíça, esse software pode ser adquirido através do site www.pvsyst.com.

3.1 Dados geográficos

A IES está localizada no interior do estado de São Paulo, com coordenadas geográficas de latitude 22,4005º e longitude 47,349º. As pesquisas pelos dados solarimétricos foram realizadas nas bases de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), National Renewable Energy Laboratory (NREL) e na base de dados Meteonorm através do software PVsyst. Adotou-se a base mais conservadora, com irradiação global horizontal anual média de 4,74 kWh/m².dia.

3.2 Dados energéticos

Com o levantamento das contas de energia elétrica, foi determinado o consumo anual de energia, o grupo de tensão e tarifas aplicáveis. Dessa forma, este trabalho considera as tarifas do grupo A4 (consumidores atendidos em média tensão), modalidade tarifária horo-sazonal verde, com demanda de potência contratada de 1000kW independente das horas de utilização, tarifação de horário fora de ponta e horário de ponta, e nos períodos de estiagem acrescido de uma das bandeiras tarifárias, amarela, vermelha 1 ou vermelha 2.

Visto que a IES é faturada pela distribuidora de energia pelo valor da energia consumida, já que o valor de demanda de potência é fixo, e existe a sazonalidade de consumo nos períodos mensais, o presente trabalho se baseará no consumo de energia anual.

3.3 Dados dos painéis solares

Como base de estudos neste trabalho, foram utilizados cinco modelos de painéis fotovoltaicos: quatro da primeira geração de células fotovoltaicas (c-Si), e um da segunda geração (CdTe), conforme apresentado na Tabela 1.

Marca	Modelo	Tecnologia	Potência (W)
Canadian Solar	BiHiKu – CS3W-420MB-AG	m-Si - Bifacial	420
	BiHiKu – CS3W-410PB-AG	p-Si - Bifacial	410
	KuMax – CS3U-395P	p-Si	395
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	m-Si	400
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO - 92W	CdTe	92

Tabela 1 - Modelos de painéis fotovoltaicos

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos *datasheets* dos fabricantes

3.4 Posicionamento dos painéis fotovoltaicos

O tipo de instalação escolhido foi o de solo, visto que foram considerados neste estudo dois modelos de painéis fotovoltaicos da nova tecnologia de silício cristalino (painéis bifaciais).

Para a análise desses modelos foi necessário determinar um tipo de superfície que favorecesse a reflexão da irradiação através do albedo, pois esses painéis captam a irradiação refletida na superfície em suas células traseiras. Utilizou-se a premissa de que a cobertura do solo seria em grama, o que segundo Ponte, Konzen e Rusche (2019), fornece uma refletância de até 25% da irradiação através do albedo, aumentando assim a eficiência desse modelo de painel.

Para determinar a potência e eficiência dos painéis acima citados, com 70% de bifacialidade segundo o fabricante, Ponte, Konzen e Rusche (2019) dizem que é necessário multiplicar os valores do albedo da cobertura do solo pelo valor da bifacialidade do painel, o que proporciona aumento de 17,5% na geração.

Aplicando esse ganho e interpolando os dados dos datasheets dos painéis bifaciais, chegou-se aos resultados de potência e eficiência apresentados na Tabela 2.

Marca	Modelo	Potência corrigida (W)	Eficiência (%)
	BiHiKu – CS3W-420MB-AG	493	22,09
Canadian Solar	BiHiKu – CS3W-410PB-AG	481	21,56
	KuMax – CS3U-395P	395	19,91
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	400	19,88
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO-92W	92	12,83

Tabela 2 – Correção da potência e eficiência dos painéis devido a bifacialidade

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos *datasheets* dos fabricantes e interpolação de dados

3.4.1 Orientação e inclinação dos painéis fotovoltaicos

No local escolhido, verificou-se a possibilidade de instalação dos painéis com orientação de azimute a 0º, ou seja, com a face totalmente voltada para o norte geográfico. Segundo Villalva (2015), em países situados no hemisfério sul como o Brasil, essa é a melhor orientação para os painéis fotovoltaicos.

Com o auxílio do software PVsyst, foi possível coletar dados do nível de irradiação solar incidente sobre o painel fotovoltaico em diversos ângulos de inclinação. A partir destes dados, adotou-se como ângulo de inclinação 27° em relação a linha do horizonte com azimute 0° para os painéis fotovoltaicos.

3.5 Estimação da quantidade de painéis fotovoltaicos

Para determinar a quantidade de painéis necessários para suprir a demanda de consumo da IES, primeiramente foi calculado um fator de ajuste entre as tarifas de ponta e fora ponta, conforme equação relatada em ANEEL (2014).

$$Faj = \frac{\text{TE ponta}}{\text{TE fora ponta}} \qquad (1)$$

Esse fator de ajuste é necessário para utilizar a energia gerada no horário fora ponta, como créditos a serem abatidos do consumo no horário de ponta.

Com o fator de ajuste determinado, foi possível calcular a quantidade necessária de energia gerada diária Qnd, de acordo com Kikumoto (2019).

$$Qnd = \frac{\text{Consumo médio fora ponta} + (Faj * \text{consumo médio ponta})}{30} \qquad (2)$$

Com os resultados das equações (1) e (2), foi possível calcular a potência de corrente contínua (CC) do sistema fotovoltaico através da equação relatada por Kikumoto (2019).

$$Potência\ CC = \frac{Qnd}{\text{Irradiação anual} * (1 - \text{fator de perdas})} \qquad (3)$$

Por meio desse cálculo foi determinado a potência do sistema para suprir tanto o consumo no horário de fora ponta, quanto no horário de ponta. Com o aumento de consumo de 2% ao ano em média nos últimos cinco anos, foi acrescido em 6,4% a Potência CC para garantir a validade desse estudo por no mínimo 8 anos, sendo considerado então uma Potência CC de 1990 kWp. O fator de perdas adotado foi de 20%, esse valor foi apresentado nas simulações através do software PVsyst.

De posse do resultado da Potência CC, realizou-se o cálculo que determinou a quantidade de painéis para cada modelo exposto neste trabalho, através da equação relatada por Kikumoto (2019).

$$Np = \frac{Potência\ CC}{\text{Potência painel}} \qquad (4)$$

3.6 Análise de sombreamento

Foi realizado a análise de sombreamento para determinar o espaçamento entre as fileiras de módulos fotovoltaicos (sheds). Essa análise é necessária para garantir que o sombreamento gerado por uma shed não incida sobre as outras durante o horário em que a geração de energia fotovoltaica é significativa.

Essa análise é realizada utilizando o software PVsyst, onde é possível determinar que as perdas geradas por sombreamento durante o solstício de inverno, que é a época em que ocorrem a menor altura solar, sejam as mínimas possíveis. A Figura 1 apresenta a análise através do software PVsyst.

Observando a Figura 1, temos as linhas de 1 a 7 indicando os períodos e porcentagem de sombreamento no sistema durante o ano. Por exemplo, a linha 1 corresponde ao dia 22 de junho (solstício de inverno), nesse dia o sistema estará com 1% de perdas devido a sombreamento entre 8h30m e 16h. É o dia em que ocorrerá a menor geração de energia no ano devido ao sombreamento.

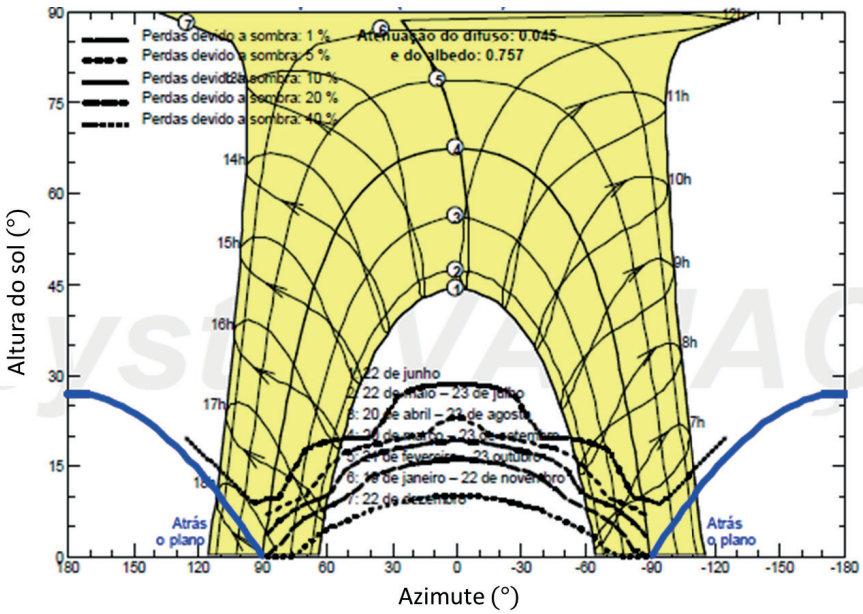


Figura 1: Análise de sombreamento - *software* PVsyst

Fonte: *Software* PVsyst

3.7 Análise de perdas

Por intermédio do software PVsyst, foi possível analisar as perdas geradas no sistema, calculando essas perdas chega-se ao valor de 20%, dentre elas estão: perdas devido a degradação, perdas devido ao nível de irradiância, perdas devido a temperatura dos módulos, perdas de módulos e strings com mismatch, perdas ôhmicas de cablagem e perdas com inversores.

4 | RESULTADOS

A quantidade de painéis obtidos pela equação (4), foi posteriormente comprovado através do software PVsyst, essa quantidade é apresentada na Tabela 3. O software também forneceu a potência em corrente alternada (P_{ca}), sendo de 1550 kW.

Marca	Modelo	Técnologia	Quantidade
Canadian Solar	BiHiKu - CS3W-420MB-AG	m-Si - Bifacial	4037
	BiHiKu - CS3W-410PB-AG	p-Si - Bifacial	4137
	KuMax - CS3U-395P	p-Si	5038
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	m-Si	4975
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO-92W	CdTe	21630

Tabela 3 - Quantidade de painéis por modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Mediante aos dados da quantidade de energia gerada anualmente por cada uma das tecnologias estudadas, foi possível verificar que o painel da fabricante Canadian Solar modelo BiHiKu CS3W-410PB-AG, é o que produz mais energia elétrica, 2.964 MWh/ano. A Tabela 4 apresenta as gerações anuais de energia elétrica fotovoltaica para cada modelo de painel estudado.

Marca	Modelo	Geração (MWh/ano)
Canadian Solar	BiHiKu - CS3W-420MB-AG	2.878,48
	BiHiKu - CS3W-410PB-AG	2.964,81
	KuMax - CS3U-395P	2.877,70
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	2.880,94
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO-92W	2.883,73

Tabela 4 - Geração de energia fotovoltaica para cada sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a implantação de um sistema de minigeração de energia elétrica fotovoltaica conectado à rede da concessionária de distribuição, será possível obter a economia apresentada na Tabela 5. Essa economia foi calculada através da quantidade de energia gerada mensalmente por cada tecnologia de painéis, e reduzindo do consumo em horários fora ponta e ponta, aplicando os impostos, tarifa de demanda, e adicional de bandeira tarifária. Foi considerado também o valor do aumento da demanda contratada, que passaria de 1000 kW para 1550 kW de potência mensais.

Marca	Modelo	Economia anual
	BiHiKu - CS3W-420MB-AG	74,55%
Canadian Solar	BiHiKu - CS3W-410PB-AG	75,98%
	KuMax - CS3U-395P	74,66%
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	74,73%
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO-92W	75,00%

Tabela 5 - Economia anual gerada na fatura de energia elétrica conforme a tecnologia

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores dos painéis, inversores e estruturas de fixação, foram fornecidos por empresas de varejo especializadas em energia solar fotovoltaica, cujos valores totais para cada sistema estão apresentados na Tabela 6.

Marca	Modelo	Total do Sistema (R$)
	BiHiKu - CS3W-420MB-AG	5.252.165,24
Canadian Solar	BiHiKu - CS3W-410PB-AG	5.053.648,63
	KuMax - CS3U-395P	7.832.420,40
Jinko Solar	JKM400M-72H-V	6.903.538,74
Tek Trade Calyxo	CX3-PRO-92W	11.643.279,86

Tabela 6 - Valores de implantação dos sistemas fotovoltaicos

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Análise de viabilidade financeira

Para Miranda (2014), as métricas utilizadas nas análises de viabilidade financeira em projetos de sistemas fotovoltaicos são o payback, o valor presente líquido (VPL), e a taxa interna de retorno (TIR). Nesse trabalho foram realizadas as três análises para os cinco modelos de sistemas de acordo com os painéis estudados. Os resultados dessa análise são apresentados no Quadro 1.

Para o cálculo do payback foi considerando a depreciação dos painéis ao longo dos anos, que segundo os datasheets dos fabricantes, é de 2,5% no primeiro ano e 0,73% a cada ano subsequente, obtendo assim uma redução de 20% no rendimento ao final de 25 anos. Considera-se também a projeção do aumento médio de 10,06% ao ano nas tarifas de energia elétrica, essa projeção foi calculada com base nas faturas de energia elétrica da IES dos anos de 2015 a 2019.

Modelo	VPL	TIR	*Payback*
BiHiKu - CS3W-420MB-AG	R$ 21.643.390,16	33,46 %	3 anos, 2 meses e 5 dias
BiHiKu - CS3W-410PB-AG	R$ 22.648.489,46	35,30 %	3 anos, 2 meses e 23 dias
KuMax - CS3U-395P	R$ 19.055.846,20	24,43 %	4 anos, 5 meses e 2 dias
JKM400M-72H-V	R$ 20.014.961,58	27,03 %	3 anos, 11 meses e 16 dias
CX3-PRO-92W	R$ 15.301.336,34	17,46 %	5 anos, 11 meses e 12 dias

Quadro 1 - Análise de viabilidade dos 5 sistemas estudados

Fonte: Elaborado pelo autor

5 I DISCUSSÕES

O melhor posicionamento para os painéis fotovoltaicos, deu-se com a orientação de azimute a 0° em relação ao norte geográfico, e inclinação de 27°, conforme demonstrado pelo software PVsyst. Com o posicionamento estabelecido, foram determinadas a potência necessária, a quantidade de painéis e a área em solo para cada modelo de painel estudado.

Também com o auxílio do software PVsyst foi realizada a análise de sombreamento. Como na área estudada não há incidência de sombras oriundas da vegetação, considerou-se apenas o sombreamento causado pelos próprios painéis uns sobre os outros, obtendo assim o distanciamento de 7 metros entre as fileiras de painéis.

Através da análise de viabilidade financeira, foi possível verificar que os modelos bifaciais possuem uma melhor performance financeira.

Verificou-se também que, para a geração da totalidade de energia elétrica consumida pela IES, é necessário realizar um aumento da demanda de potência contratada de 1000kW para 1550kW, uma vez que em ANEEL (2012), a potência do gerador de energia conectado à rede de distribuição não pode ultrapassar a demanda de potência contratada pelo consumidor.

Analisando o aumento de consumo de energia elétrica da IES nos últimos cinco anos, conclui-se que a geração fotovoltaica determinada nesse estudo, atenderá a IES por 8 anos. A partir do oitavo ano o projeto deverá ser reavaliado de forma a verificar a necessidade ou não do aumento do sistema.

6 I CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos com as análises e simulações dos modelos de painéis fotovoltaicos estudados, foi possível verificar que os painéis de c-Si possuem uma maior eficiência na geração de energia elétrica em relação aos painéis de CdTe. Outra vantagem é o custo de implantação do sistema, uma vez que a quantidade de painéis e estruturas de fixação necessários serão muito menores para os de c-Si.

Considerando a instalação em solo dos painéis fotovoltaicos, constatou-se que com a cobertura do solo sendo em grama, os painéis bifaciais apresentaram maior eficiência na geração de energia e um menor investimento na implantação de uma usina de minigeração fotovoltaica dentre os painéis estudados.

O modelo BiHiKu CS3W-410PB-AG foi o que se mostrou tecnicamente melhor para esse projeto. Através da aplicação das ferramentas de análise financeira, verificou-se que financeiramente também é o mais indicado para esse projeto. Portanto conclui-se através deste estudo que o melhor sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica a ser instalado na IES é o sistema composto pelos painéis de p-Si bifacial modelo BiHiKu CS3W-410PB-AG, em virtude de proporcionar menor custo de investimento e maior economia na fatura de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**. Agência Nacional de Energia elétrica. Rio de Janeiro, p. 12. 2012.

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída : sistema de compensação de energia elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, p. 28. 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, p. 25. 2015.

CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CENTRO DE REFERÊNCIA EM ENERGIA SOLAR. Rio de Janeiro, p. 530. 2014.

ELY, F.; SWART, J. W. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração**. IEEE Advanced Technology for Humanity, 2014. Disponivel em: <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2019.

KIKUMOTO, B. **Dimencionamento de sistemas FV para consumidores do grupo A**. Canal solar, 2019. Disponivel em: <https://canalsolar.com.br/artigos/artigos-tecnicos/item/10-dimensionamento-de-sistemas-fv-para-consumidores-do-grupo-a>. Acesso em: 03 maio 2020.

MIRANDA, A. B. C. M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado a rede**. UFRJ / Escola Politécnica. Rio de Janeiro, p. 83. 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRECESB. Rio de Janeiro, p. 530. 2014.

PONTE, G.; KONZEN, G.; RUSCHE, C. S. **Módulo bifacial: lançamento dos anos 80 aterrissa agora nos projetos comerciais**. Cenários Solar, 2019. Disponivel em: <https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/modulo-bifacial-lancamento-dos-anos-80-aterrissa-agora-nos-projetos-comerciais/>. Acesso em: 13 jun. 2020.

PVSYST. **PVsyst Photovoltaic Software**, 10 maio 2020. Disponivel em: <www.pvsyst.com>.

REIS, P. **Painéis solares de silício negro começam a ser produzidos**. Portal Energia, 2019. Disponivel em: <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-silicio-negro/>. Acesso em: 17 nov. 2019.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2º. ed. São Paulo: Érica, 2015. 224 p.

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.

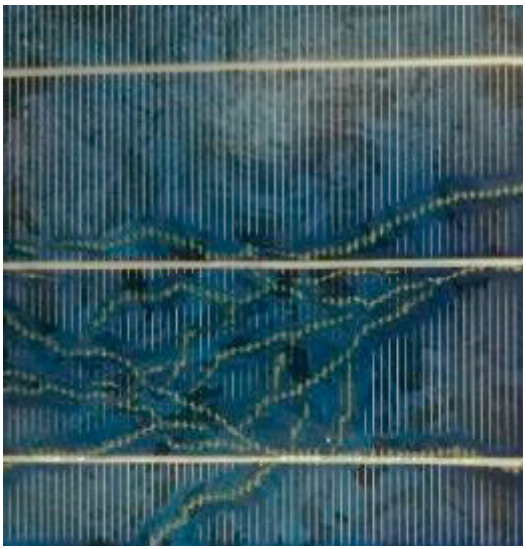


Figura 1 – Exemplo de Trilhas de Caracol (*Snail trail*)
Fonte: XiaoqingGu et al. (2018)

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.

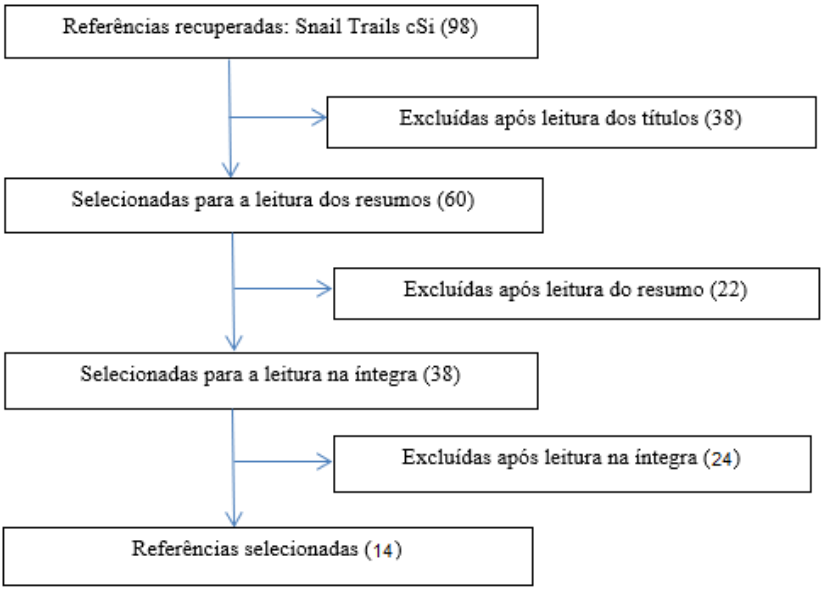


Figura 2 – Seleção das referências bibliográficas sobre o tema.

3 | 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 $AgC_2H_3O_2$, e que $AgC_2H_3O_2$ 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 à 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.

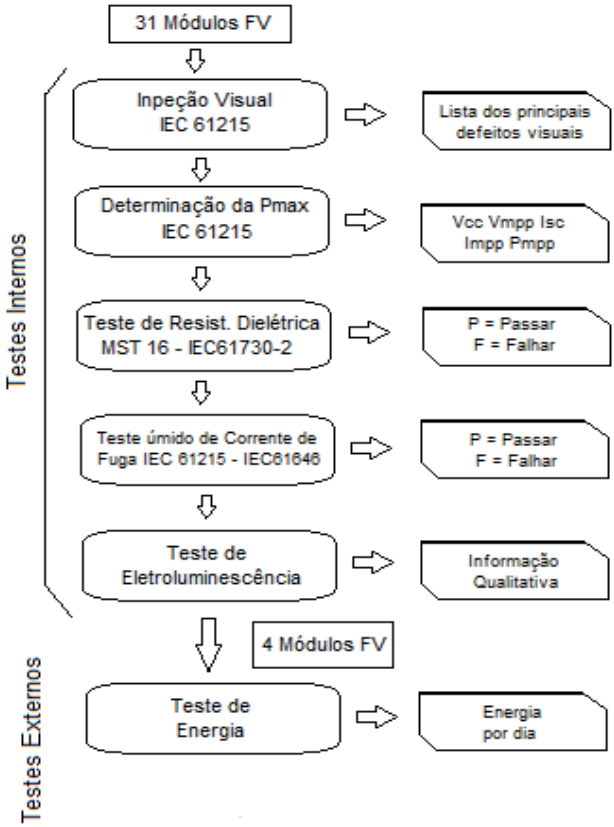


Figura 3 – Fluxograma de procedimento experimental

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 (Pn) foi calculada conforme mostrada na Equação (1):

$$\Delta P = \frac{Pmmp - Pn}{Pn} x100 \quad (1)$$

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.

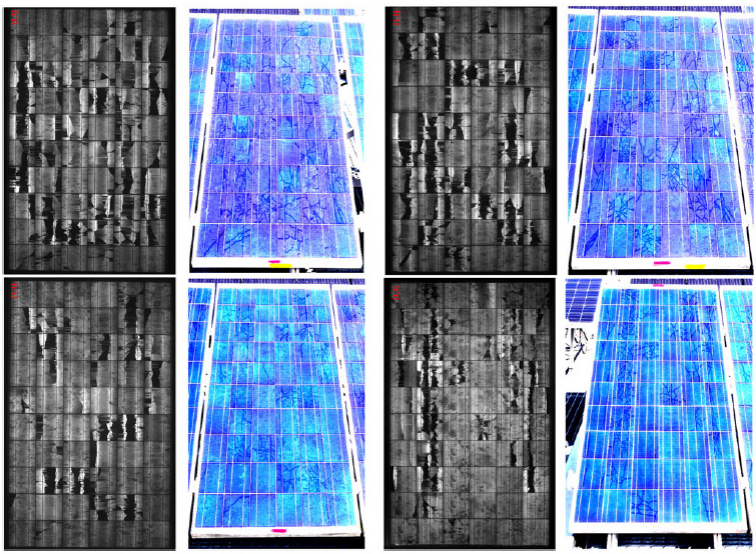


Figura 4 - Imagem de eletroluminescência e imagem dos módulos PV # 17, # 18, # 23 e # 24

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 (Zhoua 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 (Zhoua 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).

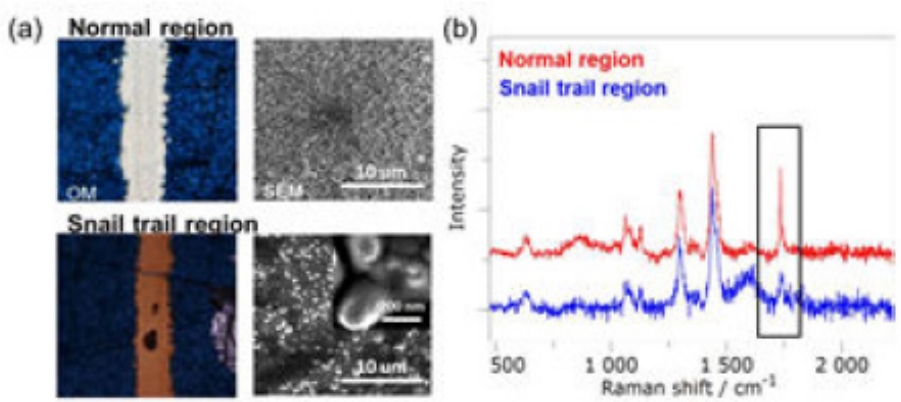


Figura 5 - (a) Imagens de microscopia em células solares não afetadas e afetadas por trilhas de caracol, respectivamente. (b) dados de EVA na região da trilha normal e com *snail trail*

Fonte: Meisel et al., 2015

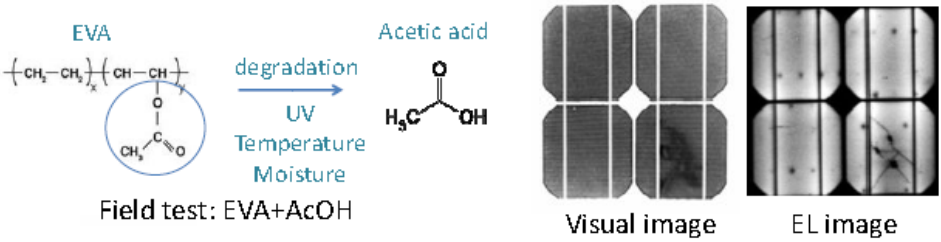


Figura 6 - Formação de ácido acético devido à degradação de EVA causada por radiação UV, temperatura e umidade (topo) e formação de snail trails para EVA que foi misturado com 0,1% de ácido acético

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 encontrado 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 I 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 experiencias. 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, Nº. 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, Nº. 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.

CAPÍTULO 11

THE IMPACT OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL ELECTRICAL PARAMETERS ON LIGHTNING OVERVOLTAGES DEVELOPED IN A 138 KV TRANSMISSION LINE

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão 31/01/2021

Felipe Mendes de Vasconcellos
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/0508094462424211

Fernando Augusto Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/8068628216980918

Rafael Silva Alípio
Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/6715701375569983

ABSTRACT: This study evaluates the overvoltages developed due to direct lightning strokes to a 138-kV transmission line tower top comparing constant and frequency-dependent soil parameters. ATP (Alternative Transients Program) was used to simulate the phenomena. The inclusion of the frequency-dependent soil parameters causes a percentage decrease of the overvoltage peaks when compared with constant soil parameters of around 15% to 33% for first strokes considering values of soil resistivity of 500 Ω.m and 2.500 Ω.m. It was also studied the counterpoise cables length reduction in order to maintain equivalent overvoltage levels to those of simulations with constant parameters. This reduction ranged from 25 to 55%, which could contribute to economic gains as well as operational efficiency in the grounding systems and transmission line construction time. Therefore, disregarding the frequency dependence of the soil parameters in simulations may lead to an overly conservative estimation of the lightning performance of the transmission line.
KEYWORDS: ATP; ground permittivity; ground resistivity; lightning; transmission line.

O IMPACTO DA DEPENDÊNCIA DE FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO EM SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS DESENVOLVIDAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 KV

RESUMO: Este estudo avalia as sobretensões desenvolvidas devido à incidência direta de descargas atmosféricas em uma torre de transmissão de 138 kV comparando parâmetros de solo constantes e dependentes de frequência. O ATP (Alternative Transients Program) foi utilizado para simular os fenômenos. A inclusão dos parâmetros de solo dependentes da frequência provoca uma diminuição percentual dos picos de sobretensão quando comparados com parâmetros de solo constantes de cerca de 15% a 33% para as primeiras descargas de retorno considerando valores de resistividade do solo de 500 Ω.m e 2.500 Ω.m. Também foi estudada a redução do comprimento dos cabos de contrapeso a fim de manter níveis de sobretensão equivalentes aos das simulações

com parâmetros constantes. Esta redução variou de 25 a 55%, o que poderia contribuir para ganhos econômicos bem como eficiência operacional nos sistemas de aterramento e tempo de construção de linhas de transmissão. Portanto, ignorar a dependência da frequência dos parâmetros do solo nas simulações pode levar a uma estimativa excessivamente conservadora do desempenho da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas.
PALAVRAS - CHAVE: ATP, permissividade do solo, resistividade do solo, descargas atmosféricas, linhas de transmissão.

1 I INTRODUCTION

Lightning is a recurring cause of transmission line failures. Generally, it is responsible for more than 50% of unscheduled line outages. These failures happen when lightning strikes the line and the overvoltages developed across line-insulators exceed their lightning withstand voltage. The backflashover is widely prevalent in lines set up in zones of soils with medium and high resistivity. This event can occur when lightning strikes a tower (or the shield wires) and the voltage wave that flows to the ground finds a high tower-footing impedance. When this occurs, extremely high grounding potential rises are developed and transmitted to the tower top. High overvoltages might be experienced across the phase insulators. If such overvoltages exceed the withstand voltage, backflashover may occur (Visacro et al. 2015).

Hence, the assessment of the lightning performance of transmission lines involves the evaluation of the overvoltages developed across insulator strings, in response to lightning strikes to the line (Electrical Transmission and Distribution Reference book, 1964).

Recent papers have determined how significant is the influence of frequency dependence of soil resistivity and permittivity on the response of grounding electrodes subject to lightning currents (Visacro et al. 2011; Visacro and Alipio, 2012; Akbari et al. 2013).

This paper particularly investigates how the frequency dependence of soil parameters (resistivity ρ and permittivity ε) influences the lightning overvoltage across insulators due to direct strikes to the line leading to the occurrence of backflashovers. In this work, the associated effects with the soil ionization process are not considered due to the long counterpoise cables usually used in transmission line grounding systems, making this effect negligible without loss of consistency of the results obtained (Visacro, 2007).

2 I MODELLING AND METHODOLOGY

2.1 Soil parameters frequency dependence

Although it is well known that soil resistivity and permittivity present important frequency dependence, the response of grounding electrodes is usually simulated assuming constant values for both soil parameters. In the absence of accurate equations to calculate

the frequency dependence of such parameters, this influence is frequently disregarded. In a common procedure, the resistivity is presumed as the value measured at low frequency and the relative permittivity of soil is considered to vary from 4 to 81, according to the soil humidity (Visacro, 2007).

Recently, a different technique for determining the frequency variation of soil resistivity and permittivity in practical conditions was developed and experimentally validated (Visacro et al. 2011). It was methodically tested to distinct soils to determine generic equations (1) and (2) to predict these parameter behaviors in the illustrative spectrum of dominant frequencies of lightning currents (Visacro and Alipio, 2012):

$$\rho_r = \{1 + [1.2 \cdot 10^{-6} \cdot {\rho_0}^{0.73}]\} \cdot [(f - 100)^{0.65}]^{-1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = 7.6 \cdot 10^3 f^{-0.4} + 1. \quad (2)$$

In these equations, suited to the 100 Hz – 4 MHz limits, is the relative resistivity, is the relative permittivity at frequency *f* in Hz and is the soil resistivity at 100 Hz.

2.2 Computational Simulation

To simulate the impact of the frequency dependence of the soil parameters in the overvoltages developed in the insulator strings of a 138 kV transmission line when struck by lightning, the first step is to select the most suitable models for each element (transmission tower, transmission line, grounding system, and lightning current) considering the transient aspects intrinsic to the phenomenon. Thus, in this section, models adopted in this work for these elements will be presented.

1) Lightning Current:

The lightning current was represented using a current source according to the model proposed by Heidler et al. (1999) available in ATP and defined by:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)}, \quad (3)$$

where

$$\eta = exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right], \quad (4)$$

and

I_0 = Peak value of the current (kA);
τ_1 = Time constant of the current rise (μs);
τ_2 = Time constant of the current decay (μs);
η = Correction factor of the current peak;
n = Current steepness factor.

2) Transmission Tower:

The tower was modeled by lossless lines. In this model, each section of the transmission tower is represented by short lines without losses that corresponds to a cylindrical conductor with equivalent radius. The values of the surge impedance are calculated according to the dimensions and the geometric configuration of each section of the tower. The model is represented in Fig. 1 (De Vasconcellos and Moreira, 2017).

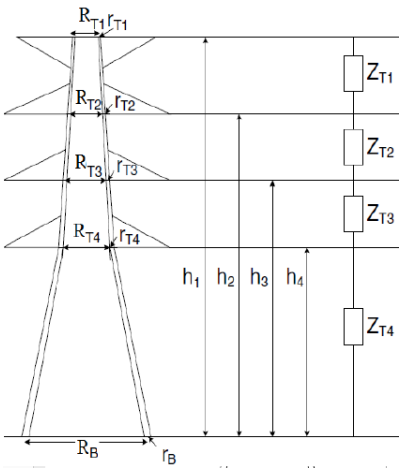


Fig. 1. Model of transmission tower by lossless lines.

3) Transmission Line:

The transmission line was modeled by the ATP Bergeron transmission line model, considering the parameters distributed and calculated for a constant typical dominant frequency, according to lightning current parameters. The line is untransposed and skin effect is taken into account. The coupling between all cables is intrinsic to the model. For the calculation of the parameters, the physical data of each of the conductors are used, such as relative physical position, diameter and ohmic resistance.

4) Grounding System:

The grounding system of the transmission towers is composed of all the metallic elements that compose the tower and that maintains contact with the ground or with the foundations, including rebar, grids, screws, etc. and any grounding devices, such as grounding rods, horizontal rings, counterpoise cables, or any combination of these that are buried in the ground. Soil resistivity is one of the main factors responsible for the performance of the grounding system of a transmission line, being influenced by the following factors: soil type, moisture content, temperature, chemical composition, retained water salt concentration, stratification and soil compaction (De Vasconcellos and Moreira, 2017).

The towers of a transmission line must be grounded in such a way to make the grounding impedance compatible with the desired performance of the line.

The electric model of the counterpoise cables is the nominal π model. The parameter values are obtained through Sunde's (Sunde, 1949) formulations:

$$R = \frac{l}{\pi . r^2} \cdot \rho_c \qquad (5)$$

$$G = \frac{\pi}{\rho . l} . \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1\right]^{-1} \qquad (6)$$

$$C = \pi . \varepsilon . l \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1\right]^{-1} \qquad (7)$$

$$L = \frac{\mu . l}{2.\pi} \left[\log \frac{2l}{\alpha} - 1\right] \qquad (8)$$

Where,

R - Counterpoise cable resistance(Ω);
G - Counterpoise cable conductance (S);
C - Counterpoise cable capacitance(F);
L - Counterpoise cable inductance (H);
ρ_c- Counterpoise cable resistivity (Ω.m);
ρ - Soil resistivity (Ω.m);
l - Counterpoise cable length (m);
r - Counterpoise cable radius (m);
α -$\sqrt{2.r.h}$ (m);
h - Counterpoise cable bury depth (m);
μ- Soil permeability (adopted as μ_0) (H/m);
ε - Soil permittivity (F/m).

Each π circuit cell represents a standard section of the cable. The general representation of the counterpoise cable used in the simulations is modeled by j identical cells corresponding each to 1 m of the counterpoise cable, as seen in Fig. 2 (Hatziargyriou and Lorentzou, 1997).

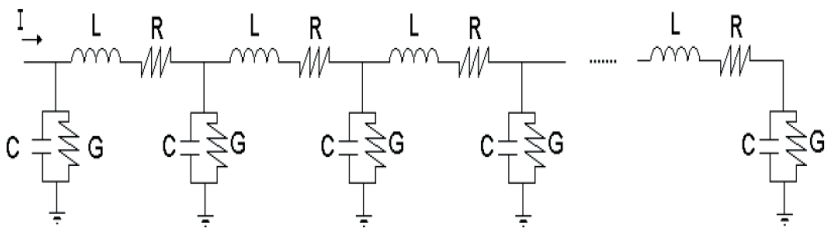


Fig. 2. Counterpoise cable general representation.

2.3 Simulated Conditons

In the simulations, the lightning strikes directly to the top of the central tower, considering two adjacent towers, according to Fig. 3 (De Vasconcellos and Moreira, 2017) and also considering first and subsequent return strokes. It is usual to consider only one adjacent span for the analysis of lightning overvoltages, as the transit time in the tower is much shorter than the transit time in the adjacent spans, so considering an adjacent span is sufficient. Typical values were obtained from measurements at the Morro do Cachimbo - MG station, in Brazil (Visacro et al. 2004), shown in Tables I, where Ip is the lightning current peak, τ1 is the front time and τ2 is the tail time. The median and critical classifications are related to the probabilistic characteristic of the measurements, in which “median” refers to measurements in which the values of the parameters associated with the lightning currents exceed in 50% those of the measured cases and “critical” to the measurements in which only 5% of the parameters exceed this set of values.

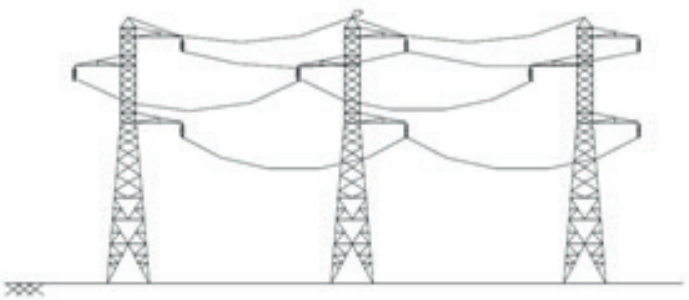


Fig. 3. Lightning strike incidence point illustration.

Lightning Current (type)	Ip (kA)	τ1 (μs)	τ2 (μs)
Median	45.3	5.6	53.5
Critical	85.2	9.9	145.2

TABLE I. First Return Stroke Parameters

Fig. 4 (Salari and Portela, 2007) shows the configuration of the simulated transmission tower, the values of the surge impedance Zt considered for each segment and the propagation speed of the surge wave, assumed to be 80% of speed of light, implemented in the simulations, respectively. In actual towers, a propagation speed lower than the speed of light is usually attributed to the effect of slants and crossarms (Chisolm, Chow and Srivastava, 1983).

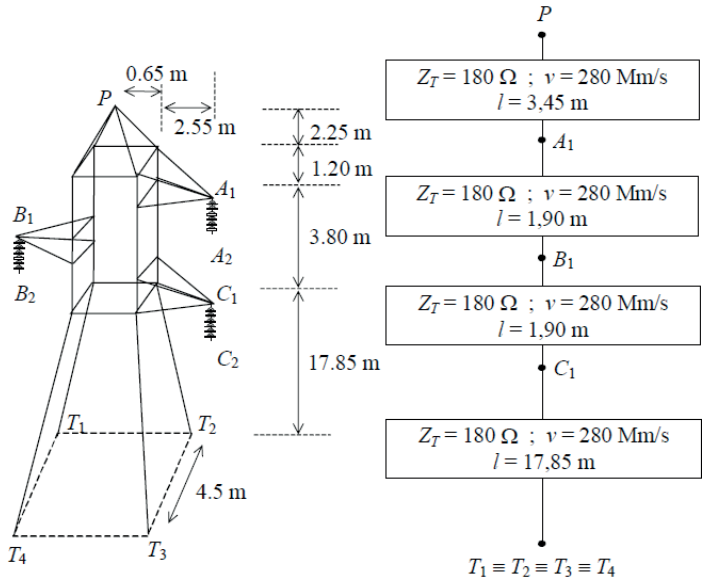


Fig. 4. 138kV transmission tower configuration and tower equivalent circuit.

The transmission line is connected to a 138 kV, 60 Hz voltage source and implemented with a 10 km length in each side of bordering towers (in this case, the reflections do not return before the end of the total study time, not affecting the results, since there is interest only in the maximum overvoltages).

The electrical and mechanical data of the cables of the transmission line are shown in Table II.

Cable name	LINNET	EHS 3/8''
Type	ACSR	EHS Class A
Span length (m)	300	300
Sags (m)	7	4
Internal radius (cm)	0.2976	0
External radius (cm)	0.9155	0.476
CC Resistance (Ω/km)	0.2032	3.81

Table II. Electrical and Mechanical Dataof the Cables

For the grounding systems, the arrangement with four 4 AWG copper-steel counterpoise cables were used, placed 60cm below the ground surface, in the longitudinal direction of the line as represented in Fig. 5 (Salari and Portela, 2007). The length of the

counterpoise cables, that vary according to the soil resistivity used in the simulations are presented in the next section with each result set.

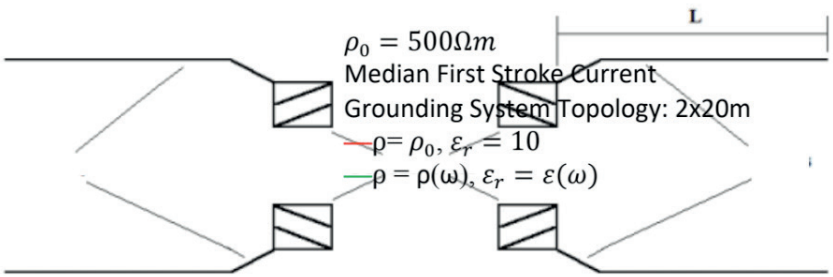


Fig. 5. Grounding arrangement representation with four counterpoise cables.

3 | RESULTS

Overvoltages developed across the upper insulator string (phase with the highest peak overvoltage, in this case) of the central tower of the 138-kV line due to a direct first strike to its top (see Fig. 3 and Table I) are shown in Section 3.1, in Figs. 6, 7, 8, and 9 and in Table III. Simulations assumed the tower configuration of Fig. 5, grounding system topology of Fig. 6, and 300-m long spans. The results considering constant soil parameters in Figs. 6 to 9 and Table III were presented and discussed originally in De Vasconcellos and Moreira (2017) and are being used in this paper to compare with the results considering the inclusion of the frequency dependence of the soil parameters and in accordance to (1) and (2). The frequency values assumed in the simulations are calculated by the inverse of the rising time of each lightning stroke current.

After finding the values of the relative resistivity and permittivity considering the calculated dominant frequency of each lightning current, they are included in all models that involve those parameters. These models are the Bergeron transmission line model and the grounding system, with the calculation of R, G, C and L of the nominal π model based on Sunde's equations with the frequency dependence of the soil parameters. Then the simulations are performed with the variation of the soil parameters as previously described.

The grounding system topologies used in De Vasconcellos and Moreira (2017) were chosen to maintain the overvoltages below the Critical Flashover Overvoltage (CFO) value, in order to reduce the probability of a backflashover occurrence and were kept the same in this work so that the results may be effectively compared.

Figures from 6 to 9 presents the overvoltage waves developed across the upper insulator string of the line under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters, with median and critical parameters and resistivities of and . Each figure has its parameters depicted on itself.

3.1 First stroke currents

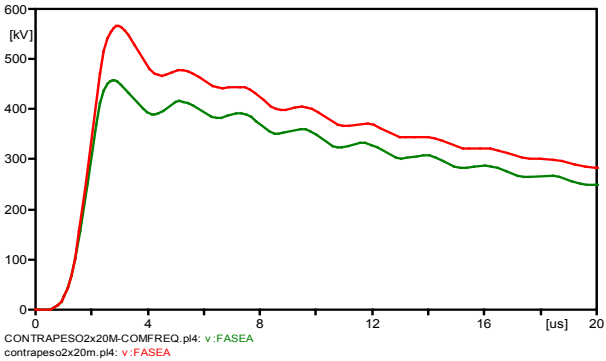


Fig. 6. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 1.

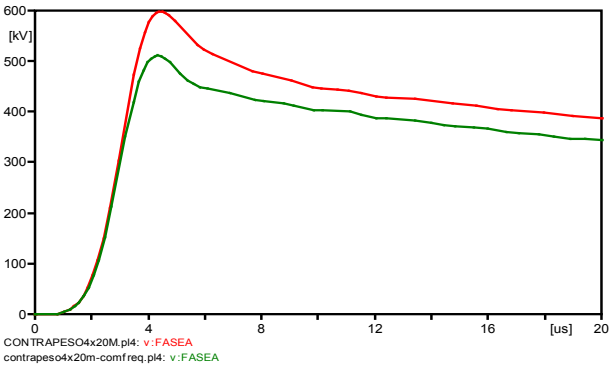


Fig. 7. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 2.

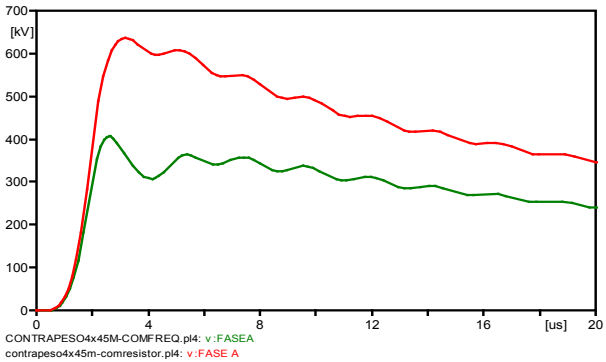


Fig. 8. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 3.

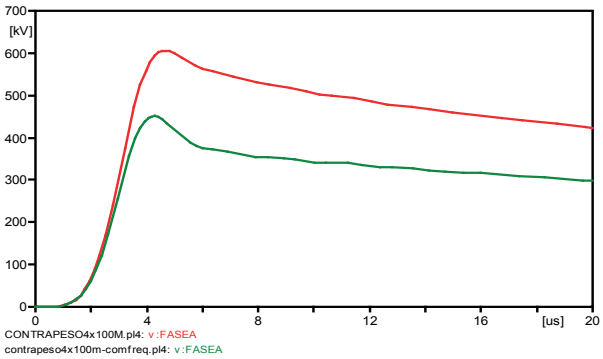


Fig. 9. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line: case 4.

ρ_0 (Ω.m)	L (m)	Overvoltage (kV) - Upper Insulator String		
		Ip = 45.3kA; τ1 = 5.6μs; τ2 = 53.5μs		
		$\rho = \rho_0$ / $\varepsilon_r = 10$	ρ(ω) / ε(ω)	Δ(%)
500	2x20m	565	458	-23%
2.500	4x45m	607	406	-33%
ρ_0 (Ω.m)	L (m)	Ip = 85.2kA; τ1 = 9.9μs; τ2 = 145.2μs;		
		$\rho = \rho_0$ / $\varepsilon_r = 10$	ρ(ω) / ε(ω)	Δ(%)
500	4x20m	598	510	-15%
2.500	4x100	610	451	-26%

Table III. Peak Overvoltage Across the Upper Insulator String of the 138-kV Line for 500 and 2.500 Ω.m for Median and critical Lightning Parameters.

The results presented in Table III demonstrate that, as expected, taking into account the frequency dependence of soil parameters produces a general decrease of overvoltage levels and this consequence is more significant as higher the soil resistivity is. This decrease is far more significant for overvoltages developed due to first strokes, varying from around 15% to 33% for soils with of 500 and 2.500 Ω.m, respectively.

The overvoltage peak values developed for first strokes indicate that considering the frequency dependence of soil resistivity and permittivity would lead to a downward trend in the number of backflashovers, since the magnitude of the overvoltages were decreased. It also contributes to keeping the peak voltages below the CFO, which is considered as 650kV for 138-kV lines, in the simulations, obtaining a more accurate and less overly conservative

estimation of the lightning performance of transmission lines.

From the results previously presented, simulations were performed to study the possibility of reducing the counterpoise cable lengths, in the case of first stroke currents to make the grounding system of the line also more efficient and less conservative.

Then, in section 3.2, in Figs. 10, 11, 12, and 13, the graphs resulting from this study are presented, with the reduction of the counterpoise cables. It were reduced until the peak overvoltages reached equivalent values (values 10% above or below) to the cases shown in section A, for constant soil parameters. These figures either presents the overvoltage waves developed across the upper insulator string of the line under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters, with median and critical parameters and resistivities of 500Ωm and 2.500Ωm. Each figure has its parameters depicted on its legends.

The simulations result and the counterpoise cable lengths variation are summarized in Table IV.

3.2 Counterpoise cable length reduction

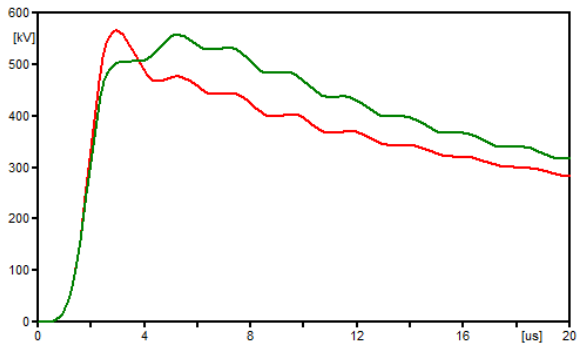


Fig. 10. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 1.

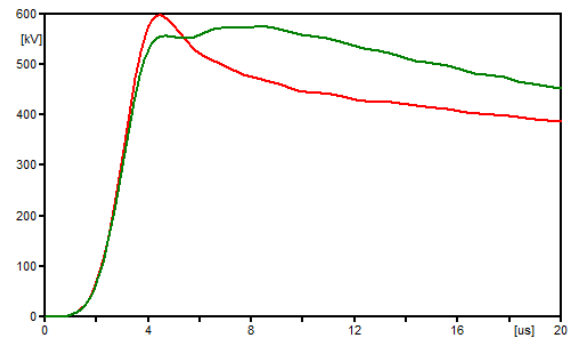


Fig. 11. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 2.

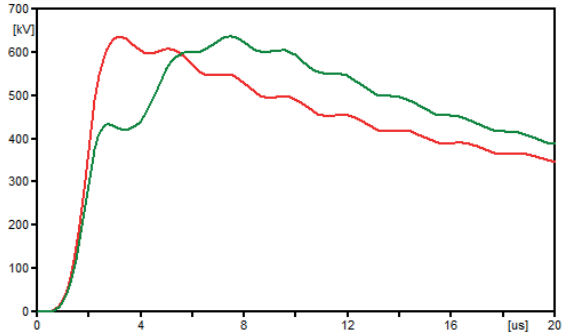


Fig. 12. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 3.

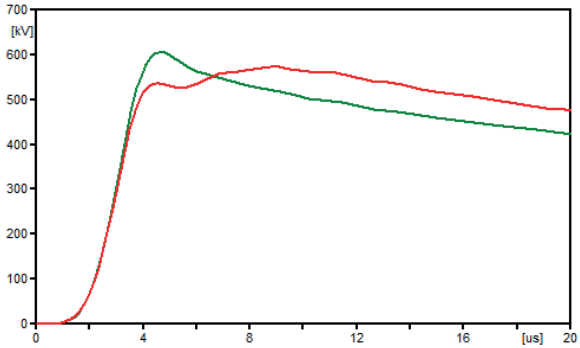


Fig. 13. Developed overvoltage waves across the upper insulator string of the line analyzing the counterpoise cable length reduction: case 4.

ρ_0 (Ω.m)	Counterpoise Cable Length (m)					
	Ip = 45.3kA; τ1 = 5.6μs; τ2 = 53.5μs			Ip = 85,2kA; τ1 = 9,9μs; τ2 = 145.2μs;		
	$\rho = \rho_0$ $\varepsilon_r = 10$	ρ(ω) ε(ω)	Δ(%)	$\rho = \rho_0$ $\varepsilon_r = 10$	ρ(ω) ε(ω)	Δ(%)
500	2x20	2x13	-35%	4x20	4x15	-25%
2.500	4x45	4x20	-55%	4x100	4x60	-40%

Table IV. Counterpoise Cables Length Reduction Maintaining Equivalent Overvoltage Levels Across the Upper Insulator String of the 138-kV Line for considered conditions.

The graphs from section 3.2 and Table IV show that including the frequency dependence of soil parameters in the simulations could contribute to a significant decrease of counterpoise cable lengths, in order to maintain equivalent overvoltage levels compared

to constant soil parameters simulations. This reduction ranged from 25 to 55%, being more prominent for higher soil resistivity values.

This percentage reduction is higher than the overvoltages reduction shown in tables III. It occurs because when the frequency dependence of the electrical soil parameters is included, the conductance of the counterpoise cables represented by the nominal π model is increased and it contributes to the reduction of resulting overvoltages from the lightning strikes. As a result, it becomes possible to moderately reduce the cables length and maintain equivalent overvoltage levels compared with the constant soil parameters simulations and below the CFO of a 138 kV transmission line.

The inclusion of the frequency dependence of the electrical soil parameters is responsible for the differences seen in the overvoltage waveforms behavior in the simulations shown in section 3. It results in a tower footing impedance with a stronger capacitive behavior than in cases when constant parameters are considered. This may be noted by the delay in the voltage wave (the peak is reached later).

4 | CONCLUSIONS

The inclusion of the frequency-dependent soil parameters generates an important decrease of overvoltages for transmission lines. This decrease is relevant for first stroke currents (from about 15% to 33% for soils of 500 and 2.500 Ω.m, respectively).

As a consequence of the previous results, it was also studied the possibility of reducing the length of the counterpoise cables in order to maintain overvoltage levels equivalent to those of simulations considering constant parameters. It was shown that it would be possible to reduce the length of the transmission line counterpoise cables by 25 to 55%, which could contribute to gains of both economic and operational efficiency on the grounding systems and also on the transmission line construction time.

The simulated results suggest a relevant improvement of the lightning performance of the studied line if the simulations include the frequency dependence of the soil electrical parameters and demonstrate the generalization of the influence of this behavior on determining transmission line overvoltages.

The simulated conditions used in this work corresponds to a first investigation and other aspects will be added in the future, for example, the randomness of the parameters of the lightning current and the value of the 60 Hz phase voltages at the moment of the lightning incidence, after all, these parameters could impact the achieved results.

REFERENCES

Akbari, M; Sheshyekani, K. and Reza Alemi, M (2013). The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems, *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 55, no. 4, pp. 739–746.

De Vasconcellos, F. M. and Moreira, F. A (2017). Evaluation and Dimensioning of Grounding Systems for Outage Reduction due to Backflashover in Transmission Lines, in *Proc. 12th Latin-American Congresson Electricity Generation and Transmission*, pp.136.

Electrical Transmission and Distribution Reference book (1964), Central Station of Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, East Pitsburg, Pensilvania, 4th Edition.

Hatziargyriou, N. D. and Lorentzou, M (1997). Grounding Systems Design Using EMTP, *23rdEuropean EMTP Users Group Meeting*, Barcelona.

Heidler, F; Cvetic, J. M. and Stanic, B. V (1999). Calculation of lightning current parameters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no 2, pp.399-404.

Salari, J. C. and Portela, C (2007). A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, pp. 527-536.

Sunde, E.D (1949). *Earth Conduction Effects in Transmission Systems,* Dover Publ. New York.

Visacro, S; Soares Jr, A and Schroeder, M. A. O et al (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbostation, *J. Geophys. Res.* (109), D01105, doi:10.1029/ 2003JD003662.

Visacro, S (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386.

Visacro, S; Alipio, R; M. Vale, M. H. and Pereira, C (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity, *IEEE Trans. Electromagn.Compat.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–406.

Visacro, S and Alipio, R (2012). Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935.

Visacro, S; Silveira, F. H; M. Vale, M. H. (2015), Simplified representation of tower-footing electrodes for assessment of the lightning performance of transmission lines using EMTP-based platforms, in *International Conference on Power Systems Transients*.

W. A. Chisolm, Y. L. Chow, and K. D. Srivastava (1983), “Lightning surge response of transmission towers,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS102, no. 9, pp. 3232–3242, Sep. 1983.

CAPÍTULO 12

A INFLUÊNCIA DO EFEITO DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO SOBRE O DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão 25/01/2021

Felipe Mendes de Vasconcellos
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/0508094462424211

Fernando Augusto Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/8068628216980918

Rafael Silva Alípio
Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/6715701375569983

RESUMO: Este estudo avalia o desempenho de uma linha de transmissão de 138 kV frente a descargas atmosféricas sob as premissas de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência. Um modelo de banda-larga foi utilizado para incluir o comportamento dependente da frequência da impedância do sistema de aterramento da torre. As sobretensões através das cadeias de isoladores foram simuladas utilizando o ATP e considerando formas de onda representativas de correntes de primeiras descargas. As taxas de desligamento por *backflashover* foram determinadas usando o método do Efeito Disruptivo (DE). Foi constatado que a diminuição do resistividade e permissividade relativa do solo resultante do efeito da dependência da frequência é responsável pela diminuição significativa das taxas de desligamento esperadas da linha testada, variando entre 29 e 55% para distribuições realísticas de resistividade do solo ao longo das linhas e uma consequente melhoria relevante no desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas.

PALAVRAS - CHAVE: linhas de transmissão, sistemas de aterramento, parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência, desempenho frente a descargas atmosféricas, backflashover.

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY DEPENDENT BEHAVIOR OF GROUND ELECTRICAL PARAMETERS ON THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

ABSTRACT: This study evaluates the lightning performance of a 138 kV transmission line under the premises of constant and frequency-dependent soil electrical parameters. A wideband model was used to include the frequency-dependent impedance behavior of the tower grounding system. The overvoltages across the insulator strings were simulated using ATP and considering representative first stroke current waveforms. Backflashover outage rates were determined using the Disruptive Effect (DE) method. It was found that the decrease of soil resistivity and relative permittivity resulting from the frequency dependence effect is responsible for the significant decrease of the expected

outage rates of the tested line, in a range of 29-55% for realistic distributions of soil resistivity along the line and a consequent relevant improvement of the lightning performance of the line.
KEYWORDS: transmission lines; grounding systems, frequency-dependent soil electrical parameters, lightning performance, backflashover.

1 | INTRODUÇÃO

A incidência de descargas atmosféricas é uma causa frequente de interrupção de linhas de transmissão. Descargas diretas à linha desenvolvem sobretensões através da cadeia de isoladores que podem resultar em ruptura do isolamento, levando a faltas (Visacro, 2007b; Visacro, Silveira and De Conti, 2012). O *backflashover* prevalece como o principal mecanismo responsável pelos desligamentos de origem atmosférica de linhas de classe de tensão abaixo de 500 kV instaladas em regiões com resistividade do solo desfavorável (Visacro, 2007b). A impedância de aterramento do "pé" da torre tem grande influência na amplitude das sobretensões de origem atmosférica (Chisholm, Chow, and Srivastava, 1983; Visacro, Silveira and De Conti, 2012), e esta é a razão da prática bastante usual de reduzir esta impedância para melhorar o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas. (Visacro, 2007b; Visacro, Silveira and De Conti, 2012).

Diversos estudos demonstram quão significativa é a influência da dependência da frequência nos parâmetros resistividade e permissividade do solo na resposta dos eletrodos de aterramento sujeitos a correntes de descargas atmosféricas (Visacro et al., 2011; Visacro and Alipio, 2012, Alipio and Visacro, 2013; Akbari, Sheshyekani and Reza Alemi, 2013; Alipio and Visacro, 2014a). Neste cenário, se torna interessante avaliar qual o impacto correspondente no desempenho das linhas de transmissão, em termos de variação da taxa de desligamento por *backflashover*, e é isto que este trabalho visa investigar.

Investigações análogas podem ser encontrada em outros estudos (Visacro et al., 2012; Visacro and Silveira, 2015). Contudo, a aplicação do modelo HEM (*Hybrid Electro Magnetic Model*) para simular os resultados de todo o sistema de transmissão resulta em um grande esforço computacional. Assim, este trabalho possui o objetivo de apresentar uma solução computacionalmente eficiente, e que permita a interface de uma modelagem de banda larga de sistemas de aterramento com o *Alternative Transients Program* – ATP (Prikler and Hoidalen, 2009), a fim de avaliar com precisão a influência e o impacto do comportamento dependente da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre a taxa de desligamento de linhas de transmissão por *backflashover*.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é descrita brevemente a metodologia e as modelagens utilizadas, na seção 3 os resultados numéricos são apresentados e analisados e na seção 4 são expostas as conclusões.

2 | METODOLOGIA E MODELAGENS

A simulação das sobretensões de origem atmosférica e o estudo correspondente do desempenho da linha de transmissão foram realizados considerando a incidência de primeiras descargas retorno típicas, medidas em torre instrumentada no Morro do Cachimbo – MG (Visacro et al., 2004). Este estudo considerou apenas a incidência de primeiras descargas de retorno em função da menor relevância das descargas subsequentes na ocorrência de *backflashover* em linhas de classe de tensão a partir de 138 kV (Silveira et al., 2012).

O método do Efeito Disruptivo (DE) foi aplicado para as sobretensões resultantes de cada condição simulada com o intuito de calcular o valor da corrente crítica de primeiras descargas de retorno capazes de induzir o desligamento por backflashover (Darveniza and Vlastos, 1988; Hileman, 1999). A probabilidade de ocorrência de cada corrente crítica foi calculada utilizando distribuições de probabilidade cumulativas de corrente de pico. Por fim, derivado das probabilidades calculadas e considerando uma ampla faixa de resistividades do solo em baixa frequência (valores de 300 a 10.000 Ω.m), que são necessárias para se fazer uma análise de sensibilidade do impacto do efeito de dependência de frequência, foi determinado o desempenho da linha de 138-kV considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

Para tanto, foram consideradas três torres com dois vãos de 400 m de uma linha de 138-kV, com a descarga atmosférica atingindo o topo da torre central. Para evitar reflexões de ondas de tensão, as extremidades das linhas são perfeitamente casadas em toda a faixa de frequência utilizando linhas infinitamente longas. A silhueta da torre e as alturas dos cabos da linha (em metros) são ilustrados na Fig. 1 (valores de meio vão são apresentados entre parênteses). A linha de transmissão tem um condutor ACSR por fase, código LINNET e um cabo de blindagem EHS de 3/8''. Um par de torres adjacentes (idênticas à da Fig. 1) é incluído nas simulações para considerar os efeitos de propagação das ondas de sobretensão nos condutores da linha, bem como as reflexões que ocorrem nos vãos adjacentes.

A Fig. 2 apresenta o arranjo de aterramento típico da linha considerada. Ele é composto por 4 cabos contrapeso, enterrados a 0,5 m de profundidade, de raio 7 mm e cada um partindo de um "pé" da base da torre.

O comprimento *L* dos cabos contrapeso é selecionado de acordo com o valor da resistividade do solo, considerando práticas comuns de concessionárias de energia brasileiras, conforme valores apresentados na Tabela 1 (ENERGISA, 2017).

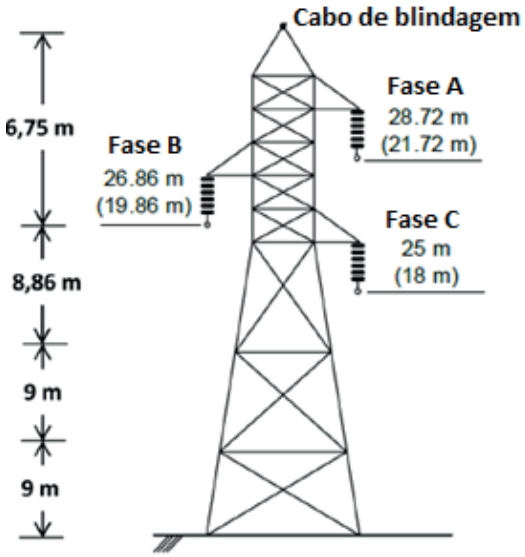


Fig. 1. Silhueta típica da torre sob análise (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

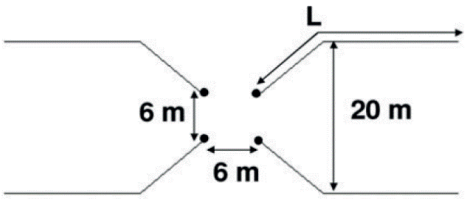


Fig. 2. Arranjo típico de aterramento de "pé" de torre (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

Resistividade do solo (Ω□m)	*L* (m)
300	20
500	30
1.000	40
3.000	60
5.000	80
10.000	130

Tabela 1. Comprimento dos cabos contrapeso em função da resistividade do solo

As simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas no ATP. A vantagem de se usar este tipo de ferramenta está no seu baixo esforço computacional quando comparado a ferramentas que utilizam abordagem de campos eletromagnéticos, e ainda assim manter precisão adequada, principalmente quando se tratam de aplicações de

engenharia (Geri and Visacro, 2002).

Neste trabalho foram desprezados os efeitos associados ao processo de ionização do solo, pois este efeito é significativo apenas quando grandes valores de correntes de descargas são aplicadas em eletrodos curtos diferente do efeito da dependência da frequência que independe da amplitude da corrente e do comprimento dos eletrodos, e de acordo com as práticas usuais de proteção em linhas de transmissão, eletrodos longos são usados para atingir baixos valores de resistência de aterramento de "pé" de torre resultando em baixa densidade linear de corrente dispersa ao longo destes. (Visacro, 2007a).

Em seguida, a modelagem de cada componente da linha de transmissão é sucintamente descrita.

2.1 Forma de Onda da Corrente de Descarga Atmosférica

A representação adequada da forma de onda da corrente da descarga atmosférica é um fator crucial, entre outros, para realizar uma avaliação rigorosa da resposta dos sistemas de potência frente a descargas atmosféricas, considerando que a consistência física dos resultados da simulação é afetada pela representatividade das ondas das correntes de descarga aplicadas (De Conti and Visacro, 2007). Conforme demonstrado por registros de medição de torres instrumentadas, as primeiras descargas de retorno são caracterizadas por uma concavidade pronunciada na frente de onda e pela ocorrência de picos múltiplos. Normalmente, o segundo pico apresenta a maior amplitude de corrente, enquanto a inclinação máxima surge próximo ao primeiro pico (Visacro et al., 2004; De Conti and Visacro, 2007).

Considerando os aspectos anteriores, a onda de corrente que reproduz aproximadamente os principais parâmetros medianos de primeiras de retorno medidos na estação do Morro do Cachimbo – MG, são ilustradas na Fig. 3, e foram utilizadas nas simulações.

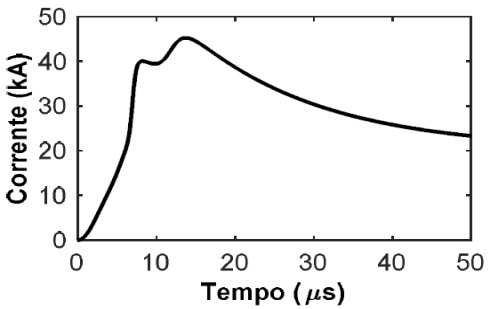


Fig. 3. Forma de onda da corrente representativa de primeiras descargas de retorno. Valores medianos de corrente de pico, tempo de frente e tempo de decaimento: , e . Adaptada de Conceição, Alipio and Dias (2018).

2.2 Torre da Linha de Transmissão

A torre é modelada como uma linha monofásica sem perdas. A impedância de surto desta linha é calculada utilizando as fórmulas de Jordan, que foram estendidas para modelar sistemas a multicondutores verticais (De Conti et al., 2006). Considerando que a torre pode ser representada por n condutores verticais que estão conectados ao mesmo ponto de injeção de corrente (topo da torre), é possível representar todo o sistema multicondutor como uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente dada por (De Conti et al., 2006):

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \ldots + Z_{1n}}{n} \qquad (1)$$

Em que

$$Z = 60\left[ln\frac{4h}{r} - 1\right] \qquad (2)$$

$$Z_{ij} = 60ln\frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}{}^2}}{d_{ij}} + 30\frac{d}{h} - 60\sqrt{\frac{1 + d_{ij}{}^2}{4h^2}} \qquad (3)$$

Em (2) e (3), h (m) é a altura do condutor, r (m) é o raio condutor, e d_{ij} (m) corresponde à distância entre os centros dos condutores i e j. Em particular, a torre da Fig. 1 foi dividida em quatro seções, cada uma representada por quatro condutores verticais. A parte inferior da torre foi representada como uma cascata de três linhas de transmissão (duas de 9 m e uma de 8,86 m de comprimento), enquanto a sua parte superior foi representada como uma única linha de transmissão de 6,75 m de comprimento. Isto foi feito para considerar a variação da seção transversal do torre com a altura, o que muda a impedância de surto mútua. A impedância de surto equivalente de cada segmento de torre foi calculada utilizando (1), (2) e (3), considerando as distâncias médias entre os condutores da torre e assumindo r=6,5 cm. O modelo da torre é mostrado na Fig. 4.

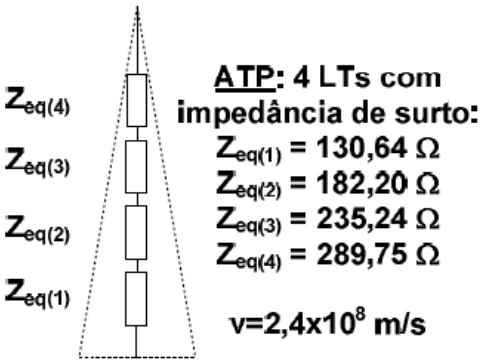


Fig. 4. Modelo da torre com os valores das impedâncias de surto por trecho (Alipio, Duarte and Lima, 2018).

2.3 Condutores da Linha de Transmissão

Para modelagem dos condutores da linha de transmissão, foi utilizado o modelo desenvolvido por J. Marti (Marti, 1982), que está implementado no ATP. Nessa plataforma, o modelo JMarti da linha é implementado via rotina *Line and Cable Constants* (LCC) cuja entrada de dados corresponde, essencialmente, às posições geométricas dos condutores da linha e às características eletromagnéticas dos condutores envolvidos (aéreos e solo). Este modelo foi adotado nas simulações pois considera a variação dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência. Nas simulações, o ajuste desses parâmetros longitudinais foi considerado para a faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz, cobrindo todo o conteúdo de frequência das descargas incidentes. A matriz de transformação modal foi calculada nas frequências de 200 kHz e 1,2 MHz para primeiras descargas e descargas subsequentes, respectivamente (em virtude dos seus tempos de frente).

2.4 Sistema de Aterramento da Torre

A rigorosa modelagem do sistema de aterramento do "pé" da torre tem uma função essencial na consistência física do comportamento impulsivo deste sistema e na determinação das sobretensões desenvolvidas através das cadeias de isoladores das linhas de transmissão pela incidência de descargas atmosféricas no cabo de blindagem ou diretamente no topo da torre (Visacro, 2007a). Estas descargas possuem correntes associadas que são frequentemente definidas por um conteúdo de frequência de *dc* a Mega-hertz, em que o sistema de aterramento do "pé" da torre revela um comportamento diferente em diferentes faixas de frequência (IEEE, 1991).

Portanto, a adequada avaliação das sobretensões de origem atmosférica e consequentemente do desempenho de uma linha de transmissão não é possível a menos que o comportamento de banda larga da frequência da impedância do sistema de aterramento seja levado em conta de forma adequada (Alemi and Sheshyekani, 2015). Esta

não é, porém, uma tarefa simples, considerando que o procedimento de inclusão do modelo de banda larga dos sistemas de aterramento na determinação da resposta impulsiva não está bem estabelecido nos simuladores numéricos de transitórios eletromagnéticos, como o ATP.

Neste trabalho, os condutores de aterramento foram representados utilizando um modelo de linha de transmissão composto por uma indutância *L* em série, e uma condutância *G* e uma capacitância *C* em paralelo. Eles podem ser modelados como circuitos 'pi-equivalentes' conectados em série com elementos distribuídos R-L-C, onde cada circuito 'pi-equivalente' corresponde a um pequeno segmento do conductor de aterramento (Lorentzou et al., 2003), conforme ilustra a Fig. 5.

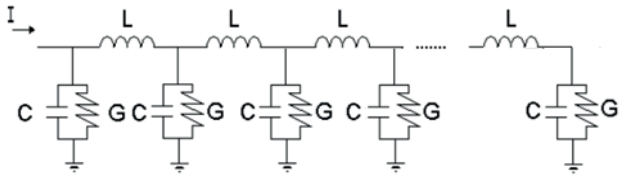


Fig. 4. Representação do condutor de aterramento. Adaptada de Lorentzou et al. (2003).

Foi feita uma adaptação do modelo original, na qual a resistência interna do cabo foi desprezada, pois esta era incluída como uma resistência de corrente contínua no ramo série da célula 'pi', o que não é fisicamente consistente em altas frequências. Vale ressaltar que mesmo a resistência interna em corrente alternada, considerando o efeito *skin*, é insignificante em relação à impedância de aterramento. Isto pode ser concluído, pois a resistência transversal do solo é infinitamente maior que a resistência interna do cabo, afinal a resistividade do solo é sempre extremamente maior que a do eletrodo de aterramento, supondo-se que este seja fabricado utilizando material condutor.

Os parâmetros R-L-C dos circuitos 'pi-equivalentes' são calculados usando (4), (5) e (6), baseado nas conhecidas expressões de Sunde (1968):

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left[log\ \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right], (l \gg a, d \ll l) \quad (4)$$

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left[log\ \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right] \quad (6)$$

onde ρ (Ω . *m*) é a resistividade da terra, *l* (*m*) é o comprimento do eletrodo, *a* (*m*) é o raio do eletrodo, *d* (em *m*) é a profundidade em que o cabo contrapeso está enterrado, ε é a permissividade do solo (*F/m*) e μ (*H/m*) é a permeabilidade do solo.

Para incluir o comportamento dependente da frequência da impedância do sistema de aterramento, a impedância harmônica *Z(jω)* do arranjo mostrado na Fig. 2 foi calculada num intervalo de frequências de 1 Hz a 10 MHz. Este parâmetro é útil para avaliar o desempenho de um sistema de aterramento independentemente das características da corrente da descarga atmosférica injetada e é definido como:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \qquad (7)$$

Em que *V(jω)* e *I(jω)* são os fasores do potencial no ponto de injeção e a corrente injetada, respectivamente.

A impedância do sistema de aterramento da torre é calculada utilizando duas abordagens diferentes, ambas utilizando o modelo de banda larga, uma com parâmetros elétricos constantes no solo e outra considerando sua dependência da frequência, utilizando (8) e (9), com base num grande número de medições de campo, nas relações causais de Kramers-Kronig e nas equações de Maxwell (Alipio and Visacro, 2014b):

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1MHz}\right)^{\gamma} \qquad (8)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \frac{tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)\cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 (1MHz)^{\gamma}} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{\gamma-1} \qquad (9)$$

Em (8) e (9), σ_0 é a condutividade do solo (*mS/m*), ε_r é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) (*mS/m*), ε_r é a permissividade relativa, $\varepsilon_{r\infty}$ é a permissividade relativa em frequências mais altas, ε_0 é a permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 \cong 8.854\times10\text{^}(-12)$ *F/m*) e *f* é a frequência em Hz. Os parâmetros $\varepsilon_{r\infty}$=12, γ=0,54 e $h(\sigma_0)$ em (10), são recomendados para obter resultados médios para a dependência de frequência dos parâmetros do solo (Alipio and Visacro, 2014b).

$$h(\sigma_0) = 1.26 \times {\sigma_0}^{0.73} \qquad (10)$$

Vale ressaltar que a consistência física dessas expressões para determinar a dependência de frequência dos parâmetros do solo foi fornecida por resultados experimentais (Visacro and Alipio, 2012; Alipio and Visacro, 2014b).

O modelo racional que aproxima a resposta em frequência da impedância harmônica

Z(jω) é obtido utilizando a técnica *Vector Fitting,* proposta por Gustavsen & Semlyen (1999). O algoritmo do *vector fitting* implementado no MATLAB® é de domínio público e está disponível *online* (Gustavsen, 2009). Essa rotina foi utilizada para ajustar a admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz em todos os casos deste trabalho. A partir do modelo racional, um circuito equivalente é sintetizado empregando a rotina *netgen.m* desenvolvida por Gustavsen (2009) e este circuito é exportado em um arquivo de texto que pode ser facilmente inserido no ATP.

2.5 Modelagem da Ruptura da Cadeia de Isoladores

O método do efeito disruptivo (método DE) é aplicado para determinar a ocorrência ou não de ruptura da cadeia de isoladores da linha. O conceito do método DE está baseado na ideia da existência de um efeito disruptivo crítico DE_C para cada configuração de isolador. Cada surto de tensão não padronizado possui um efeito disruptivo (DE) associado. Se esse valor DE exceder o valor crítico, há a ocorrência de uma descarga disruptiva, que provoca a ruptura do isolamento (Hileman, 1999). O efeito disruptivo associado a uma onda de tensão é determinado por:

$$DE = \int_{t_0}^{t} [e(t) - V_0]^k \, dt \qquad (11)$$

em que $e(t)$ corresponde à onda de tensão aplicada sobre o isolador, V_0 refere-se ao limiar de tensão a partir do qual tem início o processo de ruptura no isolador, t_0 é o instante de tempo em que o valor instantâneo de $e(t)$ ultrapassa V_0, k é um fator adimensional, e DE é a variável denominada "efeito disruptivo". Para uma linha de 138 kV típica, as constantes do método DE podem ser obtidas de acordo com Hileman (1999): DEC = 1,1506(CFO)^*k*; k = 1,36; $V0$ = 0,77CFO = 500,5 kV.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Sobretensões na Linha de Transmissão

As sobretensões desenvolvidas através da cadeia de isoladores superior (fase A) da linha de 138 kV devido a incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre são mostradas na Fig. 5. Decidiu-se por apresentar apenas os gráficos e valores correspondentes à fase A por se tratar da fase que apresentou os maiores valores de sobretensão em todos os casos estudados, sendo assim a mais relevante para o dimensionamento das proteções, além de proporcionar uma representação gráfica menos poluída.

As simulações assumiram a incidência da corrente da Fig. 3, a configuração da torre da Fig. 1 e o arranjo do sistema de aterramento da Fig. 2, e vãos de 400 m de comprimento, conforme descrito na Seção 2.

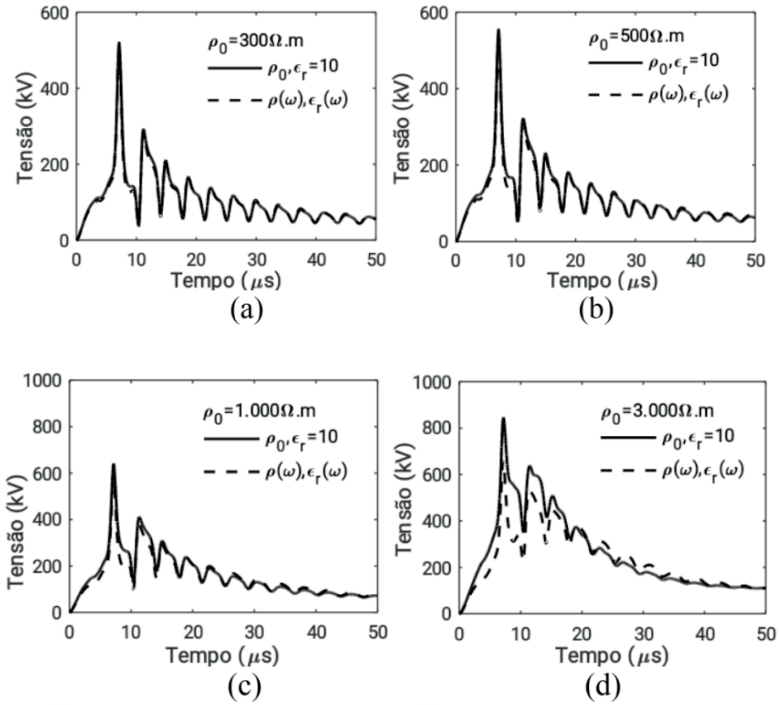
Os resultados mostram que a dependência da frequência dos parâmetros do solo não afeta significativamente a amplitude da sobretensão para solos de resistividade até

500 Ω.m, mas torna-se importante a partir deste valor. Isto é consistente com os resultados obtidos em outros trabalhos, que inclusive utilizam modelagens diversas (Visacro et al., 2012, Visacro and Silveira, 2015).

A Tabela 2 mostra claramente o impacto do efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre o pico das ondas de sobretensão da Fig. 5. Pode-se observar que a redução do pico de sobretensão (Δ) é significativa, sendo de aproximadamente 11% a 34% para ρ_0 variando de 1.000 a 10.000 Ω.m.

3.2 Corrente Crítica

Para um determinado conjunto de condições da linha e forma de onda de corrente definida, é possível identificar facilmente a corrente crítica de pico que leva à ruptura da cadeia dos isoladores. Com a forma de onda da corrente mantida, basta incrementar seu valor até encontrar a corrente de pico correspondente à amplitude de sobretensão necessária para atingir a condição de ruptura. A Fig. 6 ilustra o procedimento para determinar a corrente crítica de pico de uma corrente representativa de primeira descarga.



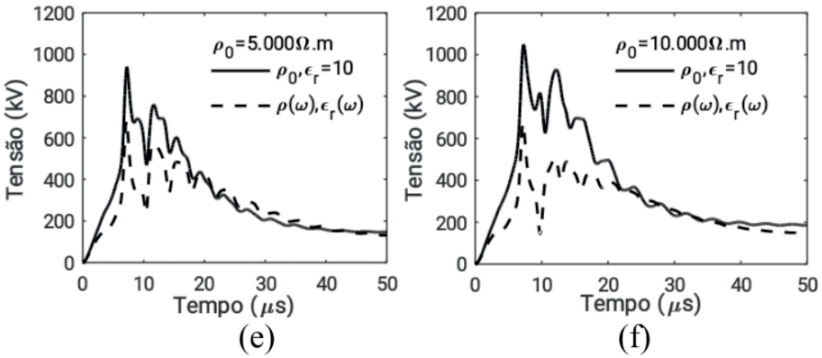


Fig. 5. Sobretensões simuladas considerando parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência.

Sobretensões na Cadeia de Isoladores da Fase A (kV)				
ρ_0 (Ω·m)	L (m)	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	Δ(%)
300	20	522	501	-4,0%
500	30	556	522	-6,1%
1.000	40	641	572	-10,8%
3.000	60	846	660	-22,0%
5.000	80	942	682	-27,6%
10.000	130	1050	693	-34,0%

Tabela 2. Valores de pico das Sobretensões simuladas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

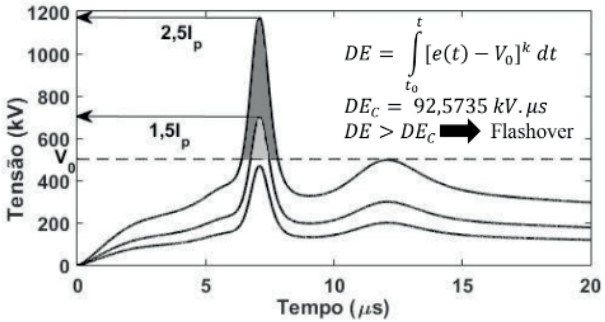


Fig. 6. Aplicação do método DE para avaliar a condição de *backflashover*.

Pode-se observarna Fig. 5 (d), (e) e (f) que, para valores de resistividade do solo acima a partir de 600 *Ω.m*, o efeito de dependência dafrequência diminui não apenas tensão de pico, mas também os valores instantâneos de tensão ao longo de um intervalo após o pico e até a estabilização das duas curvas. Isto pode ser relevante para reduzir o valor resultante da integração ao utilizar o método DE para avaliar a condição de ocorrência de *backflashover*.

Para quantificar este efeito, o método DE foi aplicado às curvas de sobretensão obtidas através de cada condição de resistividade do solo para determinar o valor de pico da corrente crítica I_c, sob a hipótese de parâmetros de solo constantes e dependentes da frequência. O I_c corresponde a um limiar, ou seja, correntes superiores a ele levam os isoladores da linha à ruptura.

Os valores calculados de I_c estão indicados na Tabela 3, juntamente com a porcentagem de correntes de pico que excedem o valor crítico ($I_p > I_c$), determinadas a partir da distribuição cumulativa de probabilidades das correntes de pico para primeiras descargas de retorno medidas na estação do Morro do Cachimbo - MG (Visacro et al., 2004), e que é aproximadamente $P_I = 1/[1 + (I/45{,}3)^{3{,}9}]$. Ao se considerar o efeito da dependência dos parâmetros do solo com a frequência as correntes críticas são aumentadas em todos os casos, e este aumento se torna mais significativo com o aumento resistividade do solo. Assim, o percentual de correntes de pico superiores ao I_c (eventos que levam a linha à ruptura de isolamento) é diminuído, conforme indicado pelo Δ. O impacto do efeito é significativo mesmo em solos de baixa resistividade, partindo de aproximadamente 18% para solos de 300 Ω·m e alcançando 66% para solos de 10.000 Ω·m.

Amplitude e Probabilidade de Ocorrência das Correntes de Descarga Críticas						
ρ_0 (Ω·m)	L (m)	$\rho=\rho_0,\ \varepsilon_r = 10$		$\rho=\rho(\omega),\ \bar{\varepsilon}(\omega)$		$\Delta(\%)$
		I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	I_C (kA)	$I_p > I_C$ (%)	
300	20	113	2,8%	119	2,3%	-17,6%
500	30	103	3,9%	111	2,9%	-24,0%
1.000	40	81	9,4%	92	5,9%	-36,2%
3.000	60	51	38,7%	65	19,7%	-49,6%
5.000	80	43	55,1%	59	26,3%	-53,5%
10.000	130	36	71,0%	57	29,0%	-66,0%

Tabela 3. Amplitude das Correntes Crítica calculadas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

3.3 Taxa de desligamento por backflashover

A avaliação do impacto do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo sobre a taxa de desligamento da linha de transmissão por *backflashover* foi desenvolvida seguindo um procedimento semelhante ao indicado por Anderson (1982). A metodologia proposta requer certas definições/informações preliminares a serem aplicadas, quais sejam a densidade de descargas atmosféricas (N_g) ao longo da linha a ser estudada, a geometria de suas torres e um conjunto de valores de resistividade do solo a ser analisada, cobrindo uma distribuição de valores encontrados ao longo do percurso que a linha atravessa.

Foi utilizado N_g=10 por se tratar de um valor médio encontrado no estado de Minas Gerais (NBR 5419, 2015), onde também está localizada a estação do Morro do Cachimbo. Além deste, outro parâmetro importante é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano (N_s), que é definido pela seguinte expressão (IEEE, 1997):

$$N_S = N_g \times \left(\frac{28h^{0,6}+b}{10}\right) \qquad (12)$$

em que h (m) é a altura da torre e b (m) é a distância entre os cabos de blindagem da torre. A divisão por "10" ocorre para converter de unidades, pois é medido em descargas/km²/ano e h e b em metros.

No cálculo da taxa de *backflashover* somente as descargas atmosféricas que incidem diretamente na torre são consideradas. De maneira empírica, assume-se que 60 % das descargas que atingem uma linha de transmissão incidem diretamente nas torres

(GRANT, ANDERSON, HILEMAN, 1985; ANDERSON, CLAYTON, ELAHIT et al., 1993). Desta forma, o número de descargas que atingem a torre de uma linha (N_T) é fornecido por (13):

$$N_T = 0{,}6 \times (N_S) \qquad (13)$$

em que N_S é o número de descargas que atingem uma linha de transmissão por 100 km por ano.

Pode-se, enfim, calcular a taxa de *backflashover* (N_{BF}). Em (14) é definido o cálculo de N_{BF} (número de desligamentos por *backflashover* por 100 km de linha por ano), representada a seguir:

$$N_{BF} = \frac{N_T}{100} \times P[I \geq I_c] \qquad (14)$$

em que N_T é o número de descargas que atingem a torre e é a probabilidade de uma corrente de descarga atmosférica ser superior a mínima corrente de descarga suficiente para que ocorra o desligamento da linha de transmissão. A divisão por "100" em (14) é para transformer o valor das probabiliades ($P[I \geq I_c]$) de porcentagem para p.u.

Com base nas probabilidades de ocorrência de correntes críticas da Tabela 4, foram calculadas as taxas de *backflashover* esperadas sob a hipótese de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência.

A análise considera nove diferentes distribuições de resistividade do solo ao longo da linha: seis distribuições uniformes (ρ_0 a partir de 300 a 10.000 Ω.m) e três distribuições não-uniformes, estas representam condições diferentes de solo ao longo da linha, sendo assim mais realistas Destas três, uma prevê apenas solos de resistividade baixa a moderada (sem incluir amostras acima de 1.000 Ω.m), outra prevê solos de resistividade moderada (amostras de todos os valores de resistividade incluídos, com maior frequência os solos com resistividade de 500 e 1.000 Ω.m), e a última prevê solos de resistividade alta a extremamente alta (sem amostras abaixo de 3.000 Ω.m).

Considerando as distribuições uniformes, os resultados da Tabela 4 mostram que a dependência de frequência provoca uma forte diminuição das taxas de desligamento por backflashover da linha em todos os casos, partindo de 20% até aproximadamente 60%.

As taxas de desligamento estimadas (por 100 km por ano) sob a hipótese de parâmetros de solo constantes variam de 1 a 26, o que demonstra o crescimento acentuado conforme a resistividade do solo é aumentada.

Esta redução também é significativa para as distribuições não-uniformes. Considerando as taxas de desligamento de 2,1; 7,6 e 19,5 (para as condições de resistividade do solo de baixa a moderada, moderada, e alta a extremamante alta) são

reduzidas em 28,6%, 50%, e 54,4%, respectivamente, devido ao efeito da dependência da frequência.

A Tabela 4 sumariza os resultados relatados anteriormente e indica a redução nas taxas de desligamento (Δ) esperadas.

Hipóteses de distribuição de ρ_0 ao longo da linha						N_{BF} (Desligamentos/100 km/ano)		
300 (Ω·m)	500 (Ω·m)	1.000 (Ω·m)	3.000 (Ω·m)	5.000 (Ω·m)	10.000 (Ω·m)	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	Δ(%)
100%	0%	0%	0%	0%	0%	1	0,8	-20,0%
0%	100%	0%	0%	0%	0%	1,4	1,1	-21,4%
0%	0%	100%	0%	0%	0%	3,4	2,2	-35,3%
0%	0%	0%	100%	0%	0%	14,1	7,2	-48,9%
0%	0%	0%	0%	100%	0%	20,2	9,6	-52,5%
0%	0%	0%	0%	0%	100%	26	10,6	-59,2%
30%	30%	40%	0%	0%	0%	2,1	1,5	-28,6%
10%	30%	30%	10%	10%	10%	7,6	3,8	-50,0%
0%	0%	0%	40%	30%	30%	19,5	8,9	-54,4%

Tabela 4. Taxas de desligamento por *backflashover* esperadas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência e diversas distribuições de resistividade de solo ao longo da linha.

Dos resultados apresentados, fica claro que a dependência da frequência dos parâmetros do solo pode afetar muito significativamente as taxas de desligamentos das linhas de transmissão, causando uma melhoria significativa do seu desempenho frente a descargas atmosféricas em todos os casos estudados.

4 | CONCLUSÕES

Foi avaliada e discutida a influência do efeito dependente da frequência da resistividade e da permissividade do solo no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Os resultados apresentados implicam numa redução significativa das sobretensões de origem atmosférica da linha testada devido à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

A dependência da frequência dos parâmetros do solo causa uma relevante redução nas sobretensões associadas às primeiras descargas de retorno para linhas instaladas em solos acima de 500 Ω.m. Isso resulta em um aumento significativo dos valores de pico das correntes críticas, levando a uma consequente redução das probabilidade de desligamento por *backflashover*.

Foi constatado que a dependência da frequência dos parâmetros do solo afeta muito significativamente a taxa de desligamento da linha estudada para toda a faixa de resistividades do solo estudada. À medida que a resistividade é aumentada, o impacto se torna mais pronunciado. Considerando as distribuições não-uniformes, e mais realistas,

de solo indicadas na Tabela 4, foram encontradas reduções das taxas de desligamento esperadas de cerca de 28% a 54,4%.

Os resultados apresentados demonstram uma melhoria significativa do desempenho da linha testada frente a descargas atmosféricas devido à dependência da frequência dos parâmetros eléctricos do solo, e atribuem uma certa generalidade ao impacto deste efeito nas linhas de transmissão.

A partir destas conclusões, faz-se clara a importância de se incluir do efeito dependente da frequência da resistividade e permissividade do solo nas avaliações de desempenho frente a descargas atmosféricas das linhas de transmissão que atravessam regiões que apresentem resistividade do solo superior a 500 Ω.m.

REFERÊNCIAS

Akbari, M, Sheshyekani, K. and Reza Alemi, M. (2013). **The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 4, pp. 739–746.

Alemi, M. R. and Sheshyekani, K. (2015). **Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 6, pp. 1627-1636.

Alipio, R. and Visacro, S. (2013). **Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139.

Alipio, R. and Visacro, S. (2014a). **Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171.

Alipio, R and Visacro, S. (2014b). **Impulse Efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters**, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723.

Alipio, R., Duarte, M. H. R. and Lima, A. C. S. (2018). **Influence of grounding representation on the lightning performance of line surge arresters — Part I: Impact on the developed overvoltages**. *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*.

Anderson, J. G. (1982). ***Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition*, chapter 12**. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Anderson, J. G., Clayton, R., Elahit, H. et al. (1993). **Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models**, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5419-2* ***Proteção Contra Descargas Atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de Risco***. Rio de Janeiro.

Chisholm, W. A., Chow, Y. L. and Srivastava, K. D. (1983). **Lightning surge response of transmission towers**. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242.

Conceição, D., Alipio, R. and Dias, R. N. (2018). **Lightning performance of wind turbine grounding systems considering typical brazilian soil conditions**. *Anais do Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE).*

Darveniza, M. and Vlastos, A. (1988). **The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standardwave shapes—A theoretical basis**. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 23, no. 3, pp. 373–381.

De Conti, A, Visacro, S, Soares, A. and Schroeder M. A. O. (2006). **Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, n. 3, pp. 530–536.

De Conti, A. and Visacro, S. (2007). **Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 49, no. 2, pp. 448-451.

ENERGISA (2017). NTU 004 - **CRITÉRIOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO**.

Geri, A. and Visacro, S.F. (2002). **Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model**. *Proc. of 26th ICLP*, Krakow, Poland.

Grant, I. S, Anderson, J.G. and Hileman, A.R. (1985), **A Simplified Method For Estimating Lightning Performance of Transmission Lines***, IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932.

Grcev, L. (2009). **Impulse efficiency of ground electrodes**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 42, no. 24, pp. 441–451.

Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). **Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, pp. 1052–1061.

Gustavsen, B. **Matrix Fitting Toolbox** [Online]. Available: https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/, 2009.

Hileman, A. (1999). **Insulation Coordination for Power Systems**. *CRC Press*, pp. 627–640.

IEEE (1991). ***IEEE Std. 142 - Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*** **(IEEE Green Book).**

IEEE (1997). ***IEEE Std. 1243 Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines.***

Lorentzou, M. I., Hatziargyriou, N. D., and Papadias, B. C. (2003). **Time domain analysis of grounding electrodes impulse response**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 517–524.

Marti, J. R. (1982). **Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation**. *IEEE Trans. Power App. And Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157.

Prikler, L. and Hoidalen, H.K. (2009). ***ATPDraw Manual, Version 5.6.***

Silveira, F. H., De Conti, A. and Visacro, S. (2010). **Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 929-935.

Silveira, F. H., Visacro, S., De Conti, A. and Mesquita, C. (2012). **Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 2, pp. 316–322.

Sunde, E. D. (1968). ***Earth Conduction Effects in Transmission Systems***. 2nd ed. New York: Dover.

Visacro, S., Soares, A., Schroeder, M.A.O., Cherchiglia, L.C.L. and Sousa, V.J. (2004). **Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station**, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, pp. 1–11.

Visacro, S. (2007a). **A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386.

Visacro, S. (2007b). **Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines**. *J. Light. Res.*, vol. 1, pp. 60–68.

Visacro, S., Alipio, R., Murta Vale, M. H. and Pereira, C. (2011). **The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity**. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–406.

Visacro, S. and Alipio, R. (2012). **Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935.

Visacro, S., Silveira, F.H. and De Conti, A. (2012). **The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines**. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 1, pp. 205-213.

Visacro, S., Silveira, F. H., Xavier, S. and Ferreira, H. B. (2012). **Frequency dependence of soil parameters: The influence on the lightning performance of transmission lines**. *Proc of 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP),* Vienna, 2012, pp. 1-4.

Visacro, S., Silveira, F. H. (2015). **The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines**. *IEEE Trans.Electromagn. Compat.*, Vol. 57, no. 3, pp. 434–441.

CAPÍTULO 13

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão 31/01/2021

Felipe Mendes de Vasconcellos
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/0508094462424211

Fernando Augusto Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia
Salvador – Bahia
http://lattes.cnpq.br/8068628216980918

Rafael Silva Alípio
Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/6715701375569983

RESUMO: Este trabalho investiga o impacto de considerar ou não as características dependentes da frequência do sistema de aterramento de uma linha de transmissão típica brasileira de 138 kV sobre a resposta impulsiva dos eletrodos de aterramento e as sobretensões desenvolvidas através das cadeias de isoladores da linha quando esta é submetida a descargas atmosféricas (primeiras descargas e subsequentes), enquanto o aterramento do "pé" da torre é representado por um modelo de banda larga. O ATP (*Alternative Transients Program*) foi utilizado para simulação dos fenômenos transitórios. Os resultados indicaram que a dependência da frequência é responsável por uma relevante diminuição da elevação do potencial de aterramento (GPR) e das sobretensões desenvolvidas na linha, variando entre 6% e 42% e 2,1% a 34%, respectivamente, considerando uma ampla faixa de resistividades do solo em baixa frequência (300 a 10.000 *Ω.m*). Tomando como referência os resultados simulados, ao se utilizar o modelo a parâmetros constantes, pode-se incorrer em superdimensionamento de proteções de linhas de transmissão, ocasionando custos desnecessários.

PALAVRAS - CHAVE: linhas de transmissão, sistema de aterramento, comportamento dependente da frequência, resistividade do solo, permissividade do solo.

EVALUATION OF THE FREQUENCY-DEPENDENT EFFECT OF SOIL PARAMETERS ON THE IMPULSIVE GROUNDING RESPONSE AND LIGHTNING OVERVOLTAGES OF TRANSMISSION LINES

ABSTRACT: This work investigates the impact of considering or not the frequency dependent characteristics of the grounding system of a typical Brazilian 138 kV transmission line on the lightning response of the grounding electrodes and the overvoltages developed across the insulator strings of the overhead line when it is subjected to lightning strikes (first and subsequent strokes), while the "tower-footing" grounding is represented by a wideband model. The ATP (Alternative Transients Program) was

used to simulate the transient phenomena.The results indicated that frequency dependence is responsible for a relevant decrease in the grounding potential rise (GPR) and the developed overvoltages, ranging from 6% to 42% and 2.1% to 34%, respectively, considering a wide range of soil resistivities at low frequency (300 to 10,000 *Ω.m*). Taking the simulated results as a reference, when using the model at constant parameters, transmission line protections could be oversized, leading to unnecessary costs.
frequência, resistividade do solo, permissividade do solo.
KEYWORDS: transmission lines; grounding systems, frequency-dependent behavior, ground resistivity, ground permittivity.

1 | INTRODUÇÃO

Projetar eficientemente os sistemas de aterramento possui um papel fundamental no bom funcionamento dos sistemas elétricos em termos de segurança humana, proteção de componentes e compatibilidade eletromagnética (EMC) (IEEE, 1991, 2000). A modelagem rigorosa dos sistemas de aterramento é uma tarefa desafiadora devido à natureza complexa do solo sob condições impulsivas, tais como a dependência de frequência de seus parâmetros elétricos e a não linearidade decorrente da ionização do solo (Geri et al., 1992; Geri, 1999; Lorentzou et al., 2003; Habjanic and Trlep, 2006; Sheshyekani et al., 2008, 2011).

A dependência da frequência da resistividade e permissividade relativa do solo é normalmente desconsiderada na análise de sistemas de aterramento de linhas de transmissão. Usualmente, e, ao contrário de sua natureza física, os parâmetros elétricos relativos do solo (resistividade e permissividade) são considerados constantes e idênticos aos valores medidos em baixa frequência. Esta suposição pode levar a resultados imprecisos, em particular, para a para a análise transitória de sistemas de aterramento situados em regiões que os solos apresentem valores de resistividade a partir de moderada (Visacro and Alipio, 2011; Alipio and Visacro, 2014). Portanto, a utilização de um modelo de solo preciso poderia é necessária para a realização de uma análise mais precisa do desempenho do sistema de aterramento. Por exemplo, esta nos dá uma melhor estimativa da taxa de *backflashover* de linhas de transmissão, que é uma importante parâmetro na otimização do custo dos sistemas de aterramento, bem como dos isoladores. Além disso, proporciona uma representação mais precisa de distribuição de corrente ao longo dos eletrodos de aterramento, que é muitas vezes importante na análise EMC.

A dependência de frequência da resistividade e permissividade relativa do solo já foi investigada por alguns estudos experimentais (Scott, 1966; Longmire and Smith, 1975). Mais recentemente, foram realizados estudos experimentais para determinar a dependência da frequência da resistividade e permissividade relativa do solo e para permitir o uso apropriado deste comportamento em uma abordagem híbrido eletromagnética para a análise de um eletrodo horizontal enterrado (Visacro and Alipio, 2011; Alipio and Visacro,

2014). Foi demonstrada que a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo pode afetar a elevação do potencial do aterramento (GPR) dos eletrodos de terra horizontais.

Este artigo investiga, particularmente, como a dependência da frequência nos parâmetros do solo (resistividade ρ e permissividade ε) influencia a resposta impulsiva do sistema de aterramento e as sobretensões desenvolvidas através dos isoladores devido a incidência direta de descargas atmosféricas na linha, mais precisamente no topo da torre.

Investigações análogas podem ser encontrada em outros trabalhos (Visacro et al., 2012; Visacro and Silveira, 2015). Entretanto, a aplicação do modelo HEM (Hybrid Electro Magnetic Model) para simular os resultados de todo o sistema de transmissão resulta em um grande esforço computacional. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma solução computacionalmente eficiente, e que permita a interface de uma modelagem de banda larga de sistemas de aterramento com o *Alternative Transients Program* – ATP (Prikler and Hoidalen, 2009).

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 descreve brevemente a metodologia e as modelagens utilizadas. Na Seção 3, os resultados numéricos são relatados e discutidos e na seção 4 as conclusões são apresentadas.

2 | METODOLOGIA E MODELAGENS

A avaliação da resposta impulsiva dos sistemas de aterramento, feita através da simulação da elevação do potencial do aterramento (GPR) no pontos de injeção, e as sobretensões de origem atmosférica da linha de transmissão foram realizadas considerando a incidência de primeiras descargas e descargas subsequentes de retorno típicas, medidas em torre instrumentada no Morro do Cachimbo – MG (Visacro et al., 2004).

Para avaliar a influência dos parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência sobre os resultados, todos os cálculos e simulações foram feitas considerando esses constantes e dependentes da frequência e uma ampla faixa de resistividade do solo em baixa frequência (valores de 300 a 10.000 Ω.m), com o intuito de se realizar um estudo de sensibilidade da consideração, ou não, do referido fenômeno.

Para tanto, foram consideradas três torres com dois vãos de 400 m de uma linha de 138-kV, com uma descarga atmosférica atingindo o topo da torre central. Para evitar reflexões de ondas de tensão, as extremidades das linhas são perfeitamente casadas em toda a faixa de frequência utilizando linhas infinitamente longas. A silhueta da torre e as alturas dos cabos da linha (em metros) são ilustrados na Fig. 1 (valores entre parênteses são de meio de vão). A linha de transmissão tem um condutor ACSR por fase, código LINNET e um cabo de blindagem EHS de 3/8''. Um par de torres adjacentes (idênticas à da Fig. 1) é incluído nas simulações para considerar os efeitos de propagação das ondas de sobretensão nos condutores da linha, bem como as reflexões que ocorrem nos vãos

adjacentes.

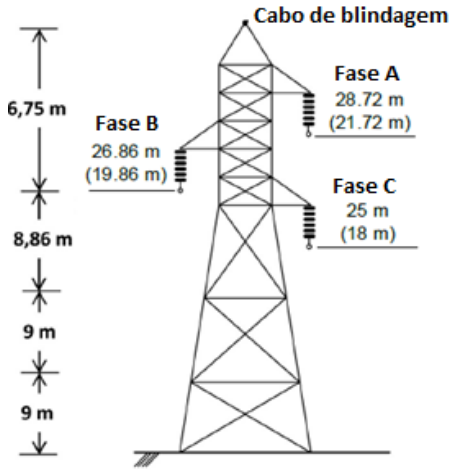


Fig. 1. Silhueta típica da torre sob análise.

A Fig. 2 apresenta o arranjo de aterramento típico da linha considerada. Ele é composto por 4 cabos contrapeso, enterrados a 0,5 m de profundidade, de raio 7 mm e cada um partindo de um "pé" da base da torre.

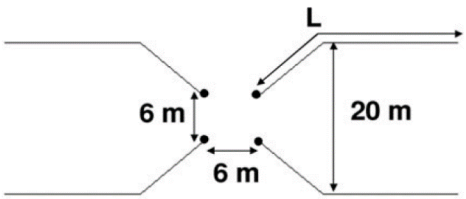


Fig. 2. Arranjo típico de aterramento de "pé" de torre.

O comprimento *L* dos cabos contrapeso é selecionado de acordo com o valor da resistividade do solo, considerando práticas comuns de concessionárias de energia brasileiras, conforme valores apresentados na Tabela 1, na página seguinte (ENERGISA, 2017).

As simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas no ATP. A vantagem de se usar esta ferramenta está no seu baixo esforço computacional quando comparado a ferramentas que utilizam abordagem de campos eletromagnéticos, e ainda assim manter precisão adequada, principalmente quando se trata de aplicações de engenharia (Geri and Visacro, 2002).

Resistividade do solo (Ω.m)	L (m)
300	20
500	30
1.000	40
3.000	60
5.000	80
10.000	130

Tabela 1. Comprimento dos cabos contrapeso em função da resistividade do solo

Neste trabalho foram desprezados os efeitos associados ao processo de ionização do solo. Este efeito é significativo apenas quando grandes valores de correntes de descargas são aplicados em eletrodos curtos, diferente da dependência de frequência efeito que não depende da amplitude da corrente e comprimento dos eletrodos. Entretanto, em linhas de transmissão, eletrodos longos são tipicamente usados para atingir baixos valores de resistência de aterramento de "pé" de torre resultando em baixa densidade linear de corrente dispersa ao longo dos eletrodos. (Visacro, 2007).

Em seguida, a modelagem de cada componente da linha de transmissão é sucintamente descrita.

2.1 Forma de Onda da Corrente de Descarga Atmosférica

A representação adequada da forma de onda da corrente de descarga atmosférica é um fator crucial, entre outros, para realizar uma avaliação rigorosa da resposta dos sistemas de potência frente a descargas atmosféricas, considerando que a consistência física dos resultados da simulação é afetada pela representatividade das ondas das correntes de descarga aplicadas (De Conti and Visacro, 2007). Conforme demonstrado por registros de medição de torres instrumentadas, as primeiras descargas de retorno são caracterizadas por uma concavidade pronunciada na frente de onda e pela ocorrência de picos múltiplos. Normalmente, o segundo pico apresenta a maior amplitude de corrente, enquanto a inclinação máxima surge próximo ao primeiro pico (Visacro et al., 2004; De Conti and Visacro, 2007).

Considerando os aspectos anteriores, as ondas de corrente que reproduzem aproximadamente os principais parâmetros medianos de primeiras descargas e descargas subsequentes medidos na estação do Morro do Cachimbo – MG são ilustradas na Fig. 3, e foram utilizadas nas simulações.

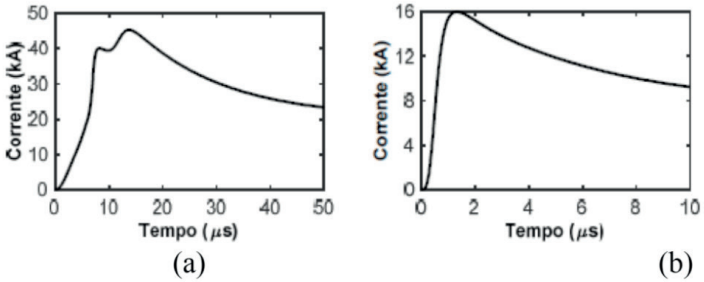


Fig. 3. Formas de onda de correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes. Valores medianos de corrente de pico, tempo de frente e tempo de decaimento: (a) $I_p = 45{,}3\ kA$, $T_{10} = 5{,}6\ \mu s$ e $T_{50} = 53{,}5\ \mu s$ e (b) $I_p = 16{,}3\ kA$, $T_{10} = 0{,}7\ \mu s$ e $T_{50} = 16{,}4\ \mu s$.

2.2 Torre da Linha de Transmissão

A torre é modelada como uma linha monofásica sem perdas. A impedância de surto desta linha é calculada utilizando as fórmulas de Jordan, que foram estendidas para modelar sistemas a multicondutores verticais (De Conti et al., 2006). Considerando que a torre pode ser representada por n condutores verticais que estão conectados ao mesmo ponto de injeção de corrente (topo da torre), é possível representar todo o sistema multicondutor como uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente Z_{eq} dada por (De Conti et al., 2006):

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \ldots + Z_{1n}}{n} \qquad (1)$$

em que

$$Z = 60\left[ln\frac{4h}{r} - 1\right] \qquad (2)$$

$$Z_{ij} = 60ln\frac{2h + \sqrt{4h^2 + {d_{ij}}^2}}{d_{ij}} + 30\frac{d}{h} - 60\sqrt{\frac{1 + {d_{ij}}^2}{4h^2}} \qquad (3)$$

Em (2) e (3), h (m) é a altura do condutor, r (m) é o raio condutor, e d_{ij} (m) corresponde à distância entre os centros dos condutores i e j. Em particular, a torre da Fig. 1 foi dividida em quatro seções, cada uma representada por quatro condutores verticais. A parte inferior da torre foi representada como uma cascata de três linhas de transmissão (duas de 9 m e uma de 8,86 m de comprimento), enquanto a sua parte superior foi representada como uma única linha de transmissão de 6,75 m de comprimento. Isto foi feito para considerar a variação da seção transversal do torre com a altura, o que muda a impedância de surto mútua. A impedância de surto equivalente de cada segmento de torre foi calculada utilizando

(1), (2) e (3), considerando as distâncias médias entre os condutores da torre e assumindo r=6,5 cm. O modelo da torre é mostrado na Fig. 4.

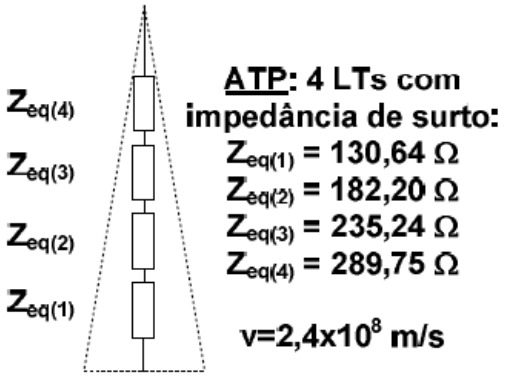


Fig. 4. Modelo da torre com os valores das impedâncias de surto por trecho.

2.3 Condutores da Linha de Transmissão

Para modelagem dos condutores da linha de transmissão, foi utilizado o modelo desenvolvido por J. Marti (Marti, 1982), que está implementado no ATP. Nessa plataforma, o modelo JMarti da linha é implementado via rotina *Line and Cable Constants* (LCC) cuja entrada de dados corresponde, essencialmente, às posições geométricas dos condutores da linha e às características eletromagnéticas dos condutores envolvidos (aéreos e solo). Este modelo foi adotado nas simulações pois considera a variação dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência. Nas simulações, o ajuste desses parâmetros longitudinais foi considerado para a faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz, cobrindo todo o conteúdo de frequência das descargas incidentes. A matriz de transformação modal foi calculada nas frequências de 200 kHz e 1,2 MHz para primeiras descargas e descargas subsequentes, respectivamente (em virtude dos seus tempos de frente).

2.4 Sistema de Aterramento da Torre

A rigorosa modelagem do sistema de aterramento do "pé" da torre tem uma função essencial na consistência física do comportamento impulsivo deste sistema e na determinação das sobretensões desenvolvidas através das cadeias de isoladores das linhas de transmissão pela incidência de descargas atmosféricas no cabo de blindagem ou diretamente no topo da torre (Visacro, 2007). Estas descargas possuem correntes associadas que são frequentemente definidas por um conteúdo de frequência de *dc* a Mega-hertz, em que o sistema de aterramento do "pé" da torre revela um comportamento diferente em diferentes faixas de frequência (IEEE, 1991).

Portanto, a adequada avaliação da resposta impulsiva e das sobretensões de origem atmosférica em uma linha de transmissão não é possível a menos que o comportamento de banda larga da frequência da impedância do sistema de aterramento seja levado em conta de forma adequada (Alemi and Sheshyekani, 2015). Esta não é, porém, uma tarefa simples, considerando que o procedimento de inclusão do modelo de banda larga dos sistemas de aterramento na determinação da resposta impulsiva não está bem estabelecido nos simuladores numéricos de transitórios eletromagnéticos, como o ATP.

Neste trabalho, os condutores de aterramento foram representados utilizando um modelo de linha de transmissão composto por uma indutância *L* em série, e uma condutância *G* e uma capacitância *C* em paralelo. Eles podem ser modelados como circuitos 'pi-equivalentes' conectados em série com elementos distribuídos R-L-C, onde cada circuito 'pi-equivalente' corresponde a um pequeno segmento do condutor de aterramento (Lorentzou et al., 2003), conforme ilustra a Fig. 5.

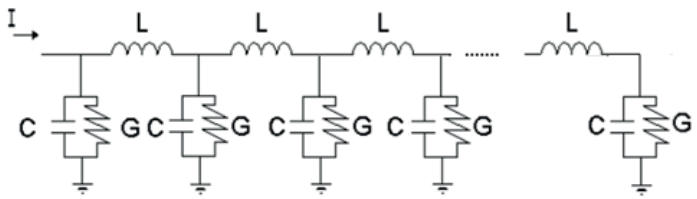


Fig. 4. Representação do condutor de aterramento.

Foi feita uma adaptação do modelo original, na qual a resistência interna do cabo foi desprezada, pois esta era incluída como uma resistência de corrente contínua no ramo série da célula 'pi', o que não é fisicamente consistente em altas frequências. Vale ressaltar que mesmo a resistência interna em corrente alternada, considerando o efeito *skin*, é insignificante em relação à impedância de aterramento. Isto pode ser concluído, pois a resistência transversal do solo é infinitamente maior que a resistência interna do cabo, afinal a resistividade do solo é sempre extremamente maior que a do eletrodo de aterramento, supondo-se que este seja fabricado utilizando material condutor.

Os parâmetros R-L-C dos circuitos 'pi-equivalentes' são calculados usando (4), (5) e (6), baseado nas conhecidas expressões de Sunde (1968):

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1\right], \qquad (l \gg a, d \ll l) \quad (4)$$

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1\right] \quad (6)$$

onde ρ (*Ω.m*) é a resistividade da terra, *l* (*m*) é o comprimento do eletrodo, *a* (*m*) é o raio do eletrodo, *d* (em *m*) é a profundidade em que o cabo contrapeso está enterrado, ε é a permissividade do solo (*F/m*) e μ (*H/m*) é a permeabilidade do solo.

Para incluir o comportamento dependente da frequência da impedância do sistema de aterramento, a impedância harmônica *Z(jω)* do arranjo mostrado na Fig. 2 foi calculada num intervalo de frequências de 1 Hz a 10 MHz. Este parâmetro é útil para avaliar o desempenho de um sistema de aterramento independentemente das características da corrente da descarga atmosférica injetada e é definido como:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)} \qquad (7)$$

Em que *V(jω)* e *I(jω)* são os fasores do potencial no ponto de injeção e a corrente injetada, respectivamente.

A impedância do sistema de aterramento da torre é calculada utilizando duas abordagens diferentes, ambas utilizando o modelo de banda larga, uma com parâmetros elétricos constantes no solo e outra considerando sua dependência da frequência, utilizando (8) e (9), com base num grande número de medições de campo, nas relações causais de Kramers-Kronig e nas equações de Maxwell (Alipio and Visacro):

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1MHz}\right)^{\gamma} \qquad (8)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \frac{\tan\left(\frac{\pi\zeta}{2}\right)\cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 (1MHz)^{\gamma}} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \cdot f^{\gamma-1} \qquad (9)$$

Em (8) e (9), σ é a condutividade do solo (*mS/m*), σ_0 é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) (*mS/m*), ε_r é a permissividade relativa, $\varepsilon_{r\infty}$ é a permissividade relativa em frequências mais altas, ε_0 é a permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 \cong 8.854\times10\text{^}(-12)$ *F/m*) e *f* é a frequência em Hz. Os parâmetros $\varepsilon_{r\infty}$ =12, γ=0,54 e h (σ_0) em (10), são recomendados para obter resultados médios para a dependência de frequência dos parâmetros do solo (Alipio and Visacro, 2014).

$$h(\sigma_0) = 1.26 \times {\sigma_0}^{0.73} \qquad (10)$$

Vale ressaltar que a consistência física dessas expressões para determinar a dependência de frequência dos parâmetros do solo foi fornecida por resultados experimentais (Visacro and Alipio, 2012; Alipio and Visacro, 2014).

O modelo racional que aproxima a resposta em frequência da impedância harmônica *Z(jω)* é obtido utilizando a técnica *Vector Fitting,* proposta por Gustavsen & Semlyen (1999). O algoritmo do *vector fitting* implementado no MATLAB® é de domínio público e está

disponível *online* (Gustavsen, 2009). Essa rotina foi utilizada para ajustar a admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz em todos os casos deste trabalho. A partir do modelo racional, um circuito equivalente é sintetizado empregando a rotina *netgen.m* desenvolvida por Gustavsen (2009) e este circuito é exportado em um arquivo de texto que pode ser facilmente inserido no ATP.

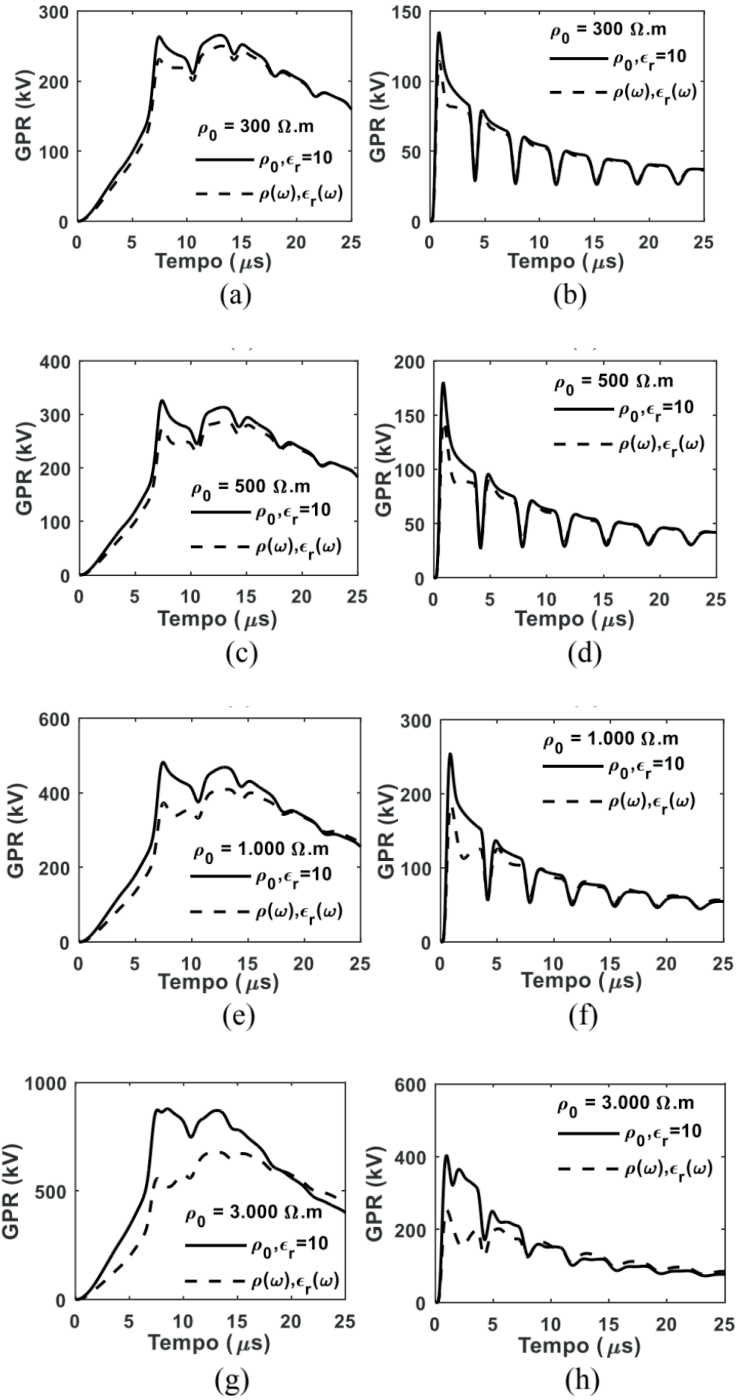
3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resposta impulsiva dos sistemas de aterramento

A Fig. 5 ilustra o GPR simulado desenvolvido em resposta à incidência de ondas de corrente representativas de primeiras descargas e descargas subsequentes ilustradas na Fig. 3 diretamente nos eletrodos de aterramento da linha de 138 kV, representados na Fig. 2. Em todos os casos, a dependência da frequência diminui o GPR, sendo essa redução menos relevante para solos de resistividade até 500 *Ω.m* e se tornando muito importante para solos de resistividade acima de 1.000 *Ω.m*. Além disso, a forma de onda da corrente da descarga incidente também influencia esta redução. O decréscimo é mais significativo para correntes de descargas subsequentes devido ao seu maior conteúdo de frequência. Nestes casos, conforme a resistividade do solo é aumentada de 300 até 10.000 *Ω.m*, as impedâncias de impulso são reduzidas de cerca de 16% a 42%. Para as primeiras descargas, a diminuição do GPR é menos significativa, de cerca de 6% (300 *Ω.m*) a 39% (10.000 *Ω.m*). Todos os percentuais de redução do valor do GPR estão explicitados e sumarizados na Tabela 3. Os resultados obtidos para múltiplos cabos contrapeso radiais, aplicados neste estudo, são consistentes com os resultados encontrados em para eletrodos horizontais simples (Alipio and Visacro, 2013).

Elevação de Potencial no aterramento - GPR (kV)							
ρ_0 (Ω·m)	L (m)	Primeiras Descargas de Retorno			Descargas Subsequentes		
		$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	Δ(%)	$\rho=\rho_0$, $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega)$, $\varepsilon(\omega)$	Δ(%)
300	20	266	250	-6%	135	114	-16%
500	30	326	287	-12%	180	145	-19%
1.000	40	482	409	-15%	254	185	-27%
3.000	60	878	677	-23%	404	253	-37%
5.000	80	1094	766	-30%	480	286	-40%
10.000	130	1343	817	-39%	586	337	-42%

Tabela 3. Valores de pico do GPR simulado considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.


GPR (kV)
Tempo (μs)
ρ_0 = 300 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(a)
ρ_0 = 300 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(b)
ρ_0 = 500 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(c)
ρ_0 = 500 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(d)
ρ_0 = 1.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(e)
ρ_0 = 1.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(f)
ρ_0 = 3.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(g)
ρ_0 = 3.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
(h)

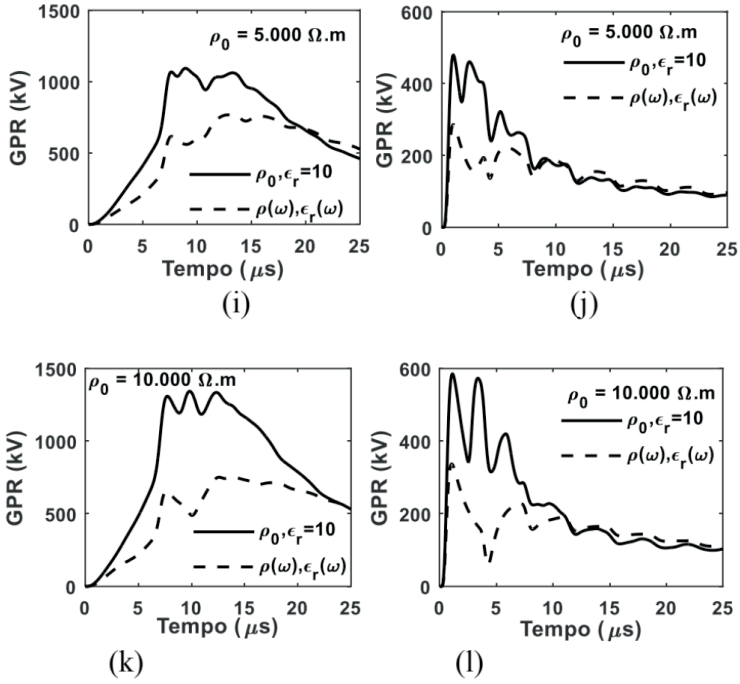


Fig. 5. GPR simulado considerando parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência e diferentes valores de resistividade do solo ρ0. Coluna esquerda: primeiras descargas; coluna direita: descargas subsequentes.

3.2 Sobretensões na Linha de Transmissão

As sobretensões desenvolvidas através da cadeia de isoladores superior (fase A) da linha de 138 kV devido a incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre são mostradas na Fig. 6. Decidiu-se por apresentar apenas os gráficos e valores correspondentes à fase A por se tratar da fase que apresentou os maiores valores de sobretensão em todos os casos estudados, sendo assim a mais relevante para o dimensionamento das proteções, além de proporcionar uma representação gráfica menos poluída.

As simulações assumiram a incidência das correntes da Fig. 3, a configuração da torre da Fig. 1 e o arranjo do sistema de aterramento da Fig. 2, e vãos de 400 m de comprimento, conforme descrito na Seção 2.

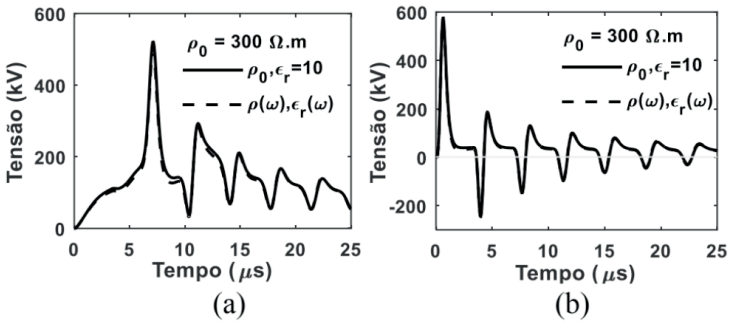
Os resultados mostram que a dependência de frequência dos parâmetros do solo não afeta significativamente a amplitude da sobretensão para solos de resistividade até 500 *Ω.m*, mas torna-se importante a partir deste valor. Isto é consistente com os resultados obtidos em outros trabalhos, que inclusive utilizam modelagens diversas (Visacro et al., 2012, Visacro and Silveira, 2015).

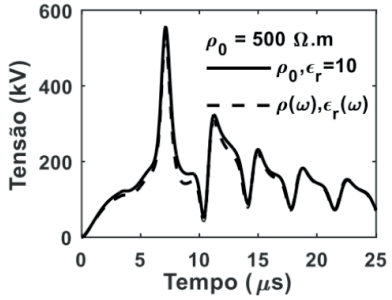
A Tabela 4 mostra claramente o impacto do efeito da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo sobre o pico das ondas de sobretensão da Fig. 6. Pode-se

observar que a redução do pico de sobretensão (Δ) é significativa apenas para primeiras descargas de retorno, sendo de aproximadamente 11% a 34% para ρ_0 variando de 1.00 a 10.000 *Ω.m*. Este resultado pode causar certo estranhamento em razão da maior redução do GPR para descargas subsequentes apresentadas anteriormente, porém este resultado é consistente com a característica de que a impedância de aterramento do "pé" da torre tem muito pouca influência sobre o pico das sobretensões causadas por descargas subsequentes diretas nas torres ou cabos-guarda (Silveira et al., 2012).

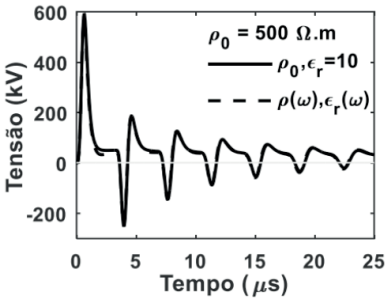
Sobretensões Desenvolvidas Através da Cadeia de Isoladores - Fase A (kV)							
ρ_0 (Ω·m)	*L* (m)	Primeiras Descargas de Retorno			Descargas Subsequentes		
		ρ=ρ₀, $\varepsilon_r = 10$	ρ=ρ(ω), ε(ω)	Δ(%)	ρ=ρ₀, $\varepsilon_r = 10$	ρ=ρ(ω), ε(ω)	Δ(%)
300	20	522	501	-4,0%	578	566	-2,1%
500	30	556	522	-6,1%	593	573	-3,4%
1.000	40	641	572	-10,8%	612	580	-5,2%
3.000	60	846	660	-22,0%	638	589	-7,7%
5.000	80	942	682	-27,6%	645	590	-8,5%
10.000	130	1050	693	-34,0%	658	596	-9,4%

Tabela 4. Valores de pico das Sobretensões simuladas considerando parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência.

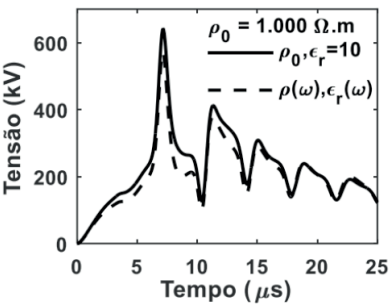



ρ_0 = 500 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

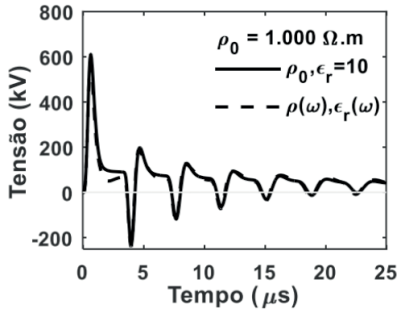
(c)


ρ_0 = 500 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

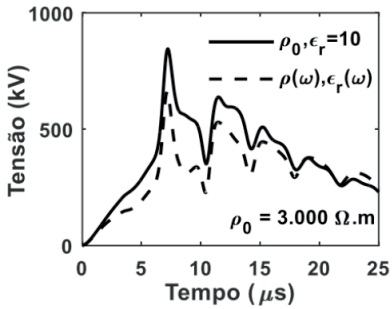
(d)


ρ_0 = 1.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

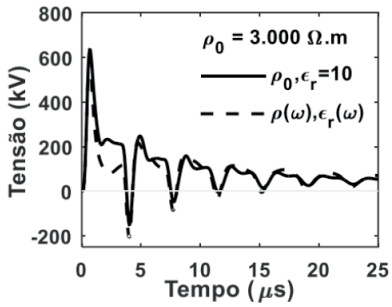
(e)


ρ_0 = 1.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

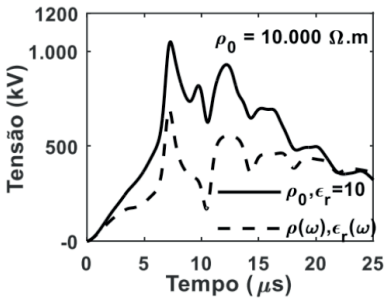
(f)


ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
ρ_0 = 3.000 Ω.m
Tensão (kV)
Tempo (μs)

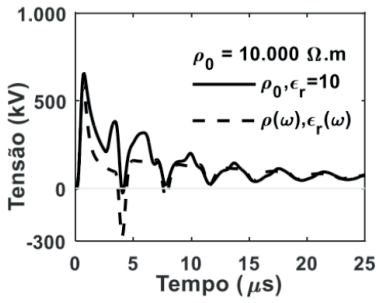
(g)


ρ_0 = 3.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

(h)


ρ_0 = 10.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

(i)


ρ_0 = 10.000 Ω.m
ρ_0,ϵ_r=10
$\rho(\omega)$,$\epsilon_r(\omega)$
Tensão (kV)
Tempo (μs)

(j)

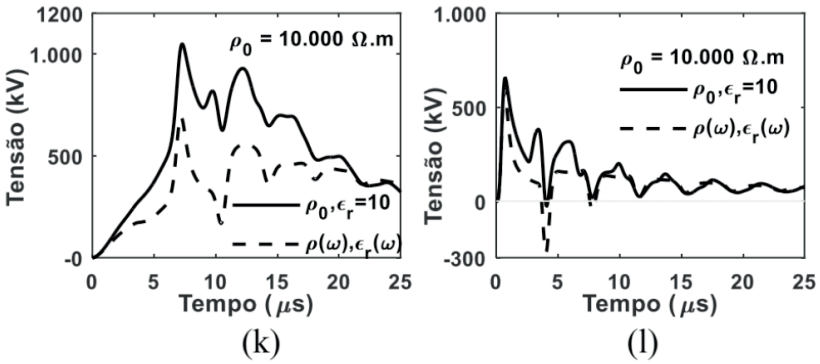


Fig. 6. Sobretensões simuladas da fase A considerando parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência e diferentes valores de resistividade do solo ρ0. Coluna esquerda: primeiras descargas; coluna direita: descargas subsequentes.

4 I CONCLUSÕES

O efeito da dependência da frequência nos parâmetros resistividade e permissividade do solo sobre a resposta impulsiva dos sistemas de aterramento e em relação às sobretensões atmosféricas desenvolvidas nas cadeias de isoladores de uma de linha de transmissão de 138 kV foi avaliado e discutido.

Em termos da resposta impulsiva do sistema de aterramento da linha, os resultados indicaram que a dependência da frequência é responsável por uma relevante diminuição da elevação do potencial de aterramento (GPR). Esta diminuição é mais pronunciada para as correntes de descarga subsequentes (de cerca de 16% a 42% para solos de 300 a 10.000 *Ω.m*, respectivamente). Para correntes de primeiras descargas, esta diminuição é de cerca de 6% a 39%, para os mesmos solos.

Apesar da redução mais forte do GPR relacionada à incidência das descargas subsequentes, o impacto em relação às sobretensões associadas às primeiras descargas de retorno é mais pronunciado, isto ocorre em função da efeito reduzido da influência da impedância de aterramento do "pé" da sobre o pico das sobretensões causadas por descargas subsequentes. A dependência da frequência dos parâmetros do solo causa uma diminuição relevante das sobretensões associadas às primeiras descargas para linhas instaladas em solos com resistividades acima de 500 *Ω.m,* variando de aproximadamente 11% a 34% considerando solos de resistividade de 1.000 a 10.000 *Ω.m*.

Pode-se constatar, também, que em todas as avaliações, a redução dos valores de pico se torna mais evidente com o aumento da resistividade do solo em baixa frequência (*ρ0*).

Os resultados apresentados implicam numa melhoria significativa da resposta impulsiva e das sobretensões de origem atmosférica da linha testada devido à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, e atribui certa generalidade ao impacto

desse efeito sobre as linhas de transmissão.

Sendo assim, torna-se recomendável considerar tal efeito nas avaliações da resposta das linhas frente a descargas atmosféricas que cruzam áreas de resistividade do solo com valores acima de 500 *Ω.m*, ao risco de incorrer em estimativas não-realísticas e consequentes equívocos nas práticas de proteção destes sistemas elétricos caso este efeito seja desprezado.

REFERÊNCIAS

Alemi, M. R. and Sheshyekani, K. (2015). Wide-Band Modeling of Tower-Footing Grounding Systems for the Evaluation of Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 6, pp. 1627-1636.

Alipio, R. and Visacro, S. (2013). Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139.

Alipio, R. and Visacro, S. (2014). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171.

Berger, K., Anderson, R.B. and Kroninger, H. (1975). Parameters of lightning flashes. *Electra*, no. 80, pp. 223–237.

De Conti, A, Visacro, S, Soares, A. and Schroeder M. A. O. (2006). Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, n. 3, pp. 530–536.

De Conti, A. and Visacro, S. (2007). Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, vol. 49, no. 2, pp. 448-451.

ENERGISA (2017). NTU 004 - CRITÉRIOS BÁSICOS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO.

Geri, A., Veca, G. M., Garbagnati, E. and Sartori, G. (1992) Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: Computer modelling and comparison with experimental results. *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 2, pp. 1442–1445.

Geri, A. (1999). Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: The model and its validation. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 1008–1017.

Geri, A. and Visacro, S.F. (2002). Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model. *Proc. of 26th ICLP*, Krakow, Poland.

Grcev, L. (2009). Impulse efficiency of ground electrodes. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 42, no. 24, pp. 441–451.

Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, pp. 1052–1061.

Gustavsen, B. Matrix Fitting Toolbox [Online]. Available: https://www.sintef.no/projectweb/vectfit/, 2009.

Habjanic, A. and Trlep, M. (2006). The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method. IEEE Trans. Power Del., vol. 42, no. 4, pp. 867–870.

IEEE (1991). *IEEE Std. 142 - Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems* (IEEE Green Book).

IEEE (2000). *IEEE Std. 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

Longmire, C. L and Smith, K. S. (1975). *A universal impedance for soils.* Defense Nuclear Agency, Washington, DC, 1975.

Lorentzou, M. I., Hatziargyriou, N. D., and Papadias, B. C. (2003). Time domain analysis of grounding electrodes impulse response. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 517–524.

Marti, J. R. (1982). Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation. *IEEE Trans. Power App. And Syst.*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157.

Prikler, L. and Hoidalen, H.K. (2009). *ATPDraw Manual, Version 5.6*.

Scott, J. H. (1966). Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil. *U.S. Geol. Surv*. Washington, DC.

Sheshyekani, K., Sadeghi, S. H. H. and Moini, R. (2008). Frequency-domain analysis of ground electrodes buried in an ionized soil due to lightning surge currents. *Proc. 29th Int. Conf. Lightning Protection*, Uppsala, Sweden.

Sheshyekani, K., Sadeghi, S. H. H., Moini, R, and Rachidi, F. (2011). Frequency domain analysis of ground electrodes buried in an ionized soil subjected to lightning surge currents: A MoM-AOM approach. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 290–296.

Silveira, F. H., De Conti, A. and Visacro, S. (2010). Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 929-935.

Silveira, F. H., Visacro, S., De Conti, A. and Mesquita, C. (2012). Backflashovers of transmission lines due to subsequent lightning strokes. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 2, pp. 316–322.

Sunde, E. D. (1968). *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. 2nd ed. New York: Dover.

Visacro, S., Soares, A., Schroeder, M.A.O., Cherchiglia, L.C.L. and Sousa, V.J. (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, pp. 1–11.

Visacro, S. (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386.

Visacro, S., Alipio, R., Murta Vale, M. H. and Pereira, C. (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 53, no. 2, pp. 401–406.

Visacro, S., Silveira, F. H., Xavier, S. and Ferreira, H. B. (2012). Frequency dependence of soil parameters: The influence on the lightning performance of transmission lines. *Proc of 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP),* Vienna, 2012, pp. 1-4.

Visacro, S., Silveira, F. H. (2015). The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines. *IEEE Trans.Electromagn. Compat.*, Vol. 57, no. 3, pp. 434–441.

CAPÍTULO 14

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 12/02/2021

José Lesina Cezar
Universidade Luterana do Brasil
Canoas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/3060084863419387

Moisés de Mattos Dias
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4783579164324276

Patrice Monteiro de Aquim
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/7098931445685566

Niklaus Veit Lauxen
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/3363430496789436

Jonathan Moling
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Marco Antônio Fröhlich
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/0997561864604119

Gabriel Mateus Neumann
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/4982023301602745

Claudionor Atílio Vingert
Agrovec Máquinas Agrícolas
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/5967130460475115

Nickolas Augusto Both
Universidade Feevale
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/7216092205680987

Giuseppe Guilherme Mergener Vingert
Agrovec Máquinas Agrícolas
Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Monir Goethel Borba
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/3052881710498127

Luiz Carlos Gertz
Universidade Luterana do Brasil
Canoas – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/1346776082936013

Lirio Schaeffer
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/1093242836059112

Alessandro Sarmento dos Santos
JSA Engenharia
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
http://lattes.cnpq.br/7436926625308553

RESUMO: A Universidade Feevale em parceria com Agrovec, JSA Engenharia e o setor de Engenharia Automotiva da ULBRA, está desenvolvendo um Veículo Elétrico Híbrido, no

qual, o motor a combustão atualmente utilizado, está sendo substituído por um Motor Síncrono Trifásico, a partir de um Inversor e baterias. Cita-se que o motor utilizado atualmente, é de 13 HP, à gasolina de uma motocicleta no qual foram implantadas algumas adequações. Desta forma, o novo Veículo em desenvolvimento, possui um Gerador a combustão (Biodiesel e Biometano) e módulo solar, ambos para carga da bateria, havendo ainda a possibilidade de as baterias serem carregadas pela rede elétrica. As baterias compreendem um banco de 4 baterias convencionais de chumbo-ácido, ligadas em série para uma tensão de 48V. Assim, o presente trabalho tem por objetivo, além da apresentação do projeto de todo o sistema de controle, a metodologia utilizada para montagem das placas de circuitos elétricos e eletrônicos, bem como suas instalações no veículo proposto. O controlador consiste basicamente de retificadores CA-CC da rede elétrica e a partir do gerador à biometano e biodiesel, controlador de carga para as baterias a partir dos retificadores e módulos solar, inversor trifásico, e sensores diversos para monitoração de todas as grandezas elétricas envolvidas. Importante salientar que o projeto se encontra nas etapas finais de montagens.
PALAVRAS - CHAVE: Veículo elétrico, energia solar, conversores, inversores.

CONVERTERS AND INVERTERS FOR ACTIVATION AND CONTROL OF A HYBRID ELECTRIC VEHICLE

ABSTRACT: The Feevale University in partnership with Agrovec, JSA Engineering and ULBRA's Automotive Engineering sector is developing a hybrid electric vehicle. The currently used combustion engine is being replaced by a three-phase synchronous motor starting from an inverter and batteries. It is said that the engine currently used is 13 HP, with gasoline from a motorcycle in which some adjustments have been implemented. Thus, the new vehicle under development, has a combustion generator (biodiesel and biomethane) and solar module, both for charging the battery, with the possibility of the batteries being charged by the power grid. The batteries comprise a bank of 4 conventional lead-acid batteries, connected in series for a voltage of 48V. Thus, the present work aims, in addition to presenting the design of the entire control system, the methodology used for assembling the electrical and electronic circuit boards, as well as their installations in the proposed vehicle. The controller basically consists of AC-DC rectifiers from the electrical network and from the biomethane and biodiesel generator, charge controller for batteries from the solar rectifiers and modules, three-phase inverter, and various sensors for monitoring all the electrical quantities involved . It is important to note that the project is in the final stages of assembly.
KEYWORDS: Electric vehicle, solar energy, converters, inverters.

1 I INTRODUÇÃO

Com o surgimento dos motores elétricos na segunda metade do século XIX, seguido da invenção das baterias recarregáveis, o inglês David Salomons criou o que viria a ser um dos primeiros exemplares de veículos elétricos funcionais. As primeiras características deste tipo de veículo já ficaram destacadas, baixo ruído, bom desempenho, mas autonomia reduzida em demasia. A produção de veículos elétricos com baterias recarregáveis se

manteve forte até o final da primeira década do século XX, porém com a expansão dos postos de combustíveis, o alto custo da energia elétrica e o sistema de produção em massa do recém criado modelo T, por Henry Ford, minaram as vendas dos veículos elétricos e o interesse público pela sua utilização (BRUNETTI).

Na segunda metade do século XX, com a crise do petróleo, o interesse público voltou os olhos a novos conceitos de propulsão, com o intuito de se tornar independente do petróleo, com isto as já grandes montadoras iniciaram o desenvolvimento de veículos 100 % elétricos e híbridos. Ao decorrer dos anos 80, a preocupação com a independência do petróleo se somou a questões ambientais, e a não poluição se tornou a principal preocupação nos novos projetos, porém a produção e comercialização destes veículos não era economicamente viável até que em 1997 a Audi e a Toyota iniciaram a produção em série de modelos híbridos (BRUNETTI).

Nos veículos híbridos os motores a combustão participam diretamente da propulsão, tendo auxílio dos motores elétricos que também funcionam como geradores em momentos de frenagem. Motores a combustão que não participam diretamente da propulsão devem ser chamados de *range extender* ou extensor de autonomia. Os extensores de autonomia são uma parte de um veículo elétrico, são responsáveis por alimentar as baterias quando estas apresentarem tensão abaixo de um valor pré-estipulado. De modo geral funcionam de forma independente do usuário, onde um gerenciador eletrônico comanda a rotação ideal e o momento em que é ligado e desligado. Três conceitos podem ser levados em conta na escolha do extensor de autonomia (MARTINS):

- O veículo deve manter as características tidas como normais, e o extensor de autonomia deve ser um motor comercial ligado à um gerador;
- O extensor de autonomia deve possuir a mais alta eficiência energética disponível em motores de combustão interna;
- Como não há funcionamento constante do extensor de autonomia, este deve priorizar por ter peso e volume reduzidos.

O primeiro conceito já é utilizado comercialmente pela General Motors, lançado em 2010 o Volt (Ampera na Europa), utiliza um motor de 4 cilindros em linha e 1.5 litros de capacidade cúbica, com rotação variando conforme as necessidades de operação. Para o segundo conceito há a necessidade de utilização de ciclos termodinâmicos de maior eficiência, tais como ciclo Miller ou Atkinson. Neste conceito os motores trabalham a rotações constantes e são otimizados para tal regime. Para o último conceito há a necessidade de motores com alta potência específica, neste caso normalmente opta-se pela utilização de motores do tipo Wankel ou de microturbinas a gás (MARTINS).

O grupo GM desenvolveu o motor GM Volt, no qual o gerador do conjunto exposto localizado dentro da caixa de mudanças, de forma que o volume total do conjunto não seja superior ao já encontrado em veículos convencionais.

As máquinas elétricas rotativas são dispositivos eletromecânicos que convertem energia elétrica em energia mecânica ou vice-versa, com diversas possibilidades de aplicação. Um gerador é capaz de converter a energia mecânica fornecida através de um eixo em energia elétrica, funcionando através do princípio do campo eletromagnético, onde um condutor ao se mover em um campo magnético, gera uma força eletromotriz que é induzida aos terminais. Um motor elétrico converte a energia elétrica em mecânica, utilizando o preceito inverso do gerador (CORREIA).

O princípio de funcionamento das máquinas elétricas pouco se alterou ao passar dos anos, mantendo características semelhantes às utilizadas no final do século XIX. Porém com os avanços tecnológicos na área dos materiais, foi possível desenvolver máquinas elétricas com peso reduzido, diminuindo a relação peso/potência (BARROS).

As novas tecnologias empregadas na fabricação dos componentes internos das máquinas elétricas reduziram os espaços ocupados em cerca de 60%, o que acabou por popularizar o uso de máquinas elétricas em aplicações industriais e residenciais. As máquinas elétricas são classificadas em variadas categorias tais como frequência de rotação do eixo, princípio de conversão de energia, modelo de corrente elétrica utilizado e das particularidades de construção do rotor e estator. (BARROS).

Em um veículo elétrico-híbrido no qual geradores e motores trifásicos de tensão alternada estão ligados a fontes de tensão contínua, como baterias, alguns dispositivos elétricos-eletrônicos estão envolvidos. A seguir uma nomenclatura usual para cada dispositivo (HART):

- Conversor CC-CC: Conversão de níveis de tensão contínua. Como exemplo, controlador de carga e carregador de baterias a partir de painéis solar

- Conversor CA-CA: Conversão de níveis de tensão alternada. Como exemplo, em Aerogeradores que geram tensão e frequência variáveis, de acordo com a velocidade dos ventos, deve-se adequar os níveis de tensão à rede. Outro exemplo são inversores para motores, capaz de gerar amplitudes e frequências variáveis para acionamento de motores com variação de velocidade. Um conversor CA-CA, basicamente é constituído de um retificador, um oscilador e um dispositivo reforçador de corrente.

- Inversor CC-CA. Gerar uma tensão alternada a partir de tensão contínua. Como exemplo gerar tensão alternada trifásica ou monofásica a partir de baterias. Em um conversor CA-CA sempre haverá um inversor.

- Retificador CA-CC. Gerar um nível de tensão contínua a partir de uma tensão alternada. Em um conversor CA-CC sempre haverá um Retificador.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estrutura do Veículo e Diagrama Elétrico

A Agrovec é uma empresa de pequeno porte do sul do Brasil, a qual, já há alguns anos fabrica veículos para aplicação agrícola, conforme pode ser observado na figura 1. Atualmente, estes veículos possuem tração a partir de motor de motocicleta à gasolina, com algumas adaptações na transmissão. Assim, este trabalho por objetivo a substituição deste motor à gasolina por um sistema elétrico híbrido. Participam ainda deste projeto o Setor de Automotiva da ULBRA e a JSA Engenharia.



Figura 1 – Modelos de veículos produzido pela Agrovec

O novo veículo será tracionado por um motor elétrico síncrono trifásico de 9 kW ou 12 HP, acoplado diretamente na caixa de engrenagens. O rotor do motor elétrico será construído a partir de ferro sinterizado e ímãs permanentes de NdFeB utilizando-se os processos da metalurgia do pó. O veículo, por ser híbrido, terá um grupo motor-gerador ou gerador à combustão, ou seja, um gerador elétrico acoplado a um motor à combustão, o qual será adaptado de um motor à diesel de 5 kW para biometano e biodiesel. A energia elétrica gerada pelo gerador à combustão, a partir de retificador e um conversor CC-CC ou Controlador de Carga, irá carregar uma Bateria de alta amperagem. Um módulo solar com película flexível montado no teto da cabine também carregará a bateria a partir de controlador de carga. O motor elétrico que irá tracionar o veículo será alimentado pela bateria, a partir de um inversor trifásico. Haverá ainda a possibilidade de a bateria ser carregada a partir da rede elétrica. A figura 2 mostra o Diagrama em Blocos deste acionamento.

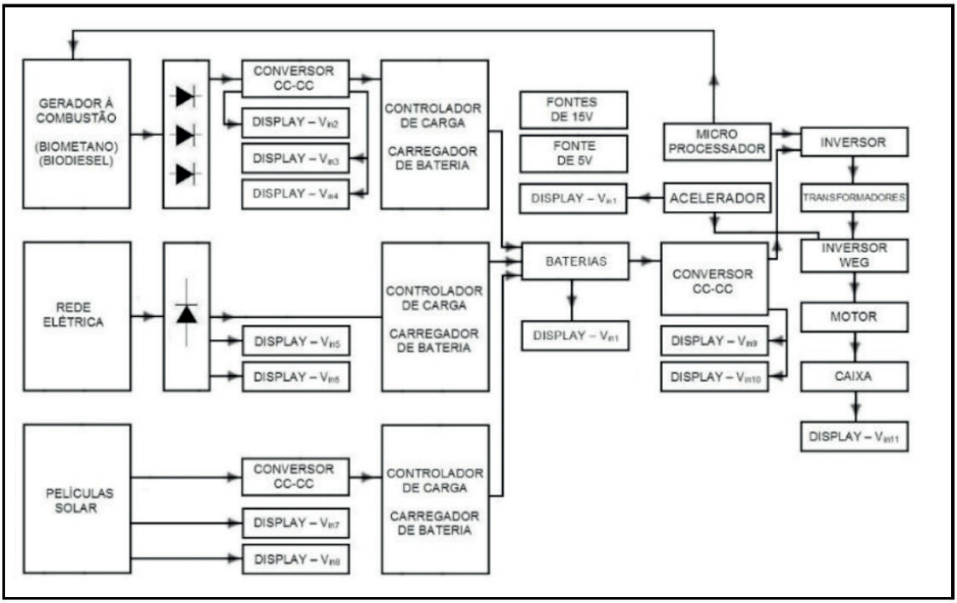


Figura 2 – Diagrama em Blocos do Acionamento para o Veículo Elétrico Híbrido

2.2 Montagens Mecânicas do Motor e Fontes

O motor síncrono trifásico de 9 kW a ser utilizado para tração do veículo elétrico híbrido, foi montado sobre uma base de um motor de indução trifásico 4 polos, 10 CV, fabricado pela Voges Motores, do qual foram aproveitados, a carcaça, as chapas do núcleo do estator, o eixo, rolamentos e tampas, que são peças comuns para vários tipos de motores AC (corrente alternada). O desenvolvimento consistiu em fabricar um novo rotor a partir de material sinterizado de alta resistividade elétrica (e não chapas como os motores convencionais) embutindo-se ímãs permanentes de NdFeB de elevada retentividade e coercitividade (figura 3-a). Além de um novo rotor, também o estator foi rebobinado (figura 3-b) a fim de suportar os novos níveis de tensão e fluxo magnético de entreferro, bem como as novas potências envolvidas. Nesta configuração, e possível modificar um motor de indução comum em um motor trifásico de alto desempenho e rendimento. O motor foi montado e pintado (figura 3-c), e acoplado na caixa de câmbio (de Chevette) adaptada ao veículo (figuras 3-d e 3-e). Nos testes em bancada o motor desenvolveu uma potência de 9 kW, a uma velocidade de 3.000 RPM, e rendimento de 94%.

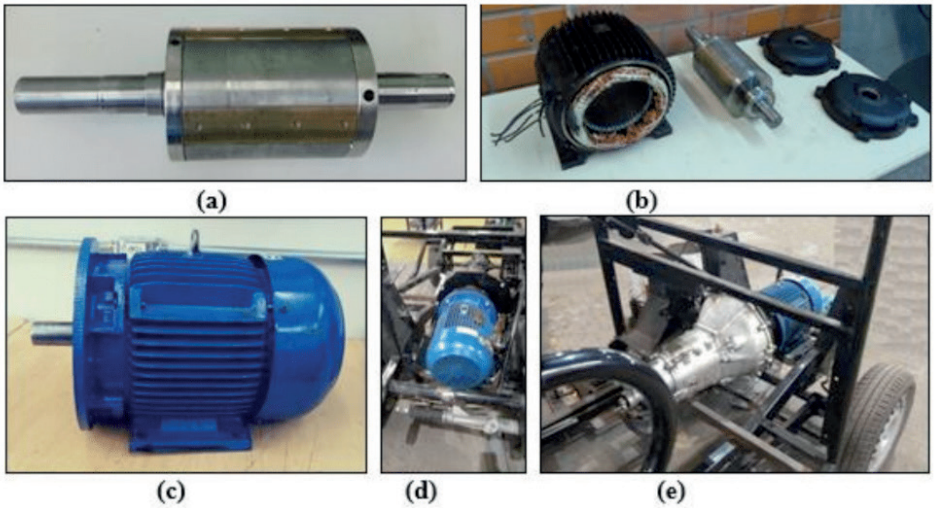


Figura 3 – Motor elétrico síncrono trifásico para tração do veículo – (a) Rotor sinterizado – (b) Estator e Tampas – (c) Motor Montado e Pintado – (d) Motor montado no Veículo – (e) Detalhe da Caixa de Câmbio

O mesclador é um misturador ar-gás também conhecido, e tem como função principal realizar a correta mistura entre o ar que está sendo admitido pelo motor e o gás que está sendo usado como combustível. Após o desenvolvimento em CAD do mesclador, é realizado uma simulação de fluxo de ar, através de um software de simulação como o Solidworks Flow Simulation, e para a fabricação da peça pode-se utilizar o alumínio, e a manufatura através do processo de usinagem, em uma fresadora CNC.

Dentre as muitas tecnologias já disponíveis na área de células solares, pode-se destacar um grupo específico de células chamado células fotovoltaicas de filmes finos. No veículo será utilizado 3 películas flexíveis Elfeland SP-37 18V 100 Wp com 28 células monocristalinas, coladas em uma chapa de aço curvada, instalada no teto do veículo.

Conforme mostra o diagrama esquemático da figura 2, 3 fontes carregam as baterias, a saber, o gerador à combustão (biodiesel e biometano), o módulo solar, e a rede elétrica. observa-se que os sinais, após a retificação (gerador e rede), um controlador de carga (MPPT / Solar Charge Controler), carrega as baterias. Cita-se que este controlador, apesar da citação solar, pode ser utilizado para outros tipos de dispositivos para carga de bateria, desde que os níveis de tensão e corrente estejam adequados. Com relação ao Inversor, o qual aciona o motor elétrico do veículo, conforme mostra o digrama esquemático da figura 2, a tensão do banco de baterias é elevada (Conversor CC-CC elevador), passa por um inversor trifásico e após, alimenta o inversor / WEG CFW-08 de 10 kW.

2.3 Cargas das Baterias

Conforme mostra o diagrama esquemático da figura 2, três fontes carregam as baterias a partir dos controladores de carga. Contudo, para que as tensões sejam colocadas na entrada dos controladores, estas devem ser ajustadas, a partir de circuitos retificadores e conversores CC-CC. Assim, as figuras 4,5 e 6 mostram estes circuitos.

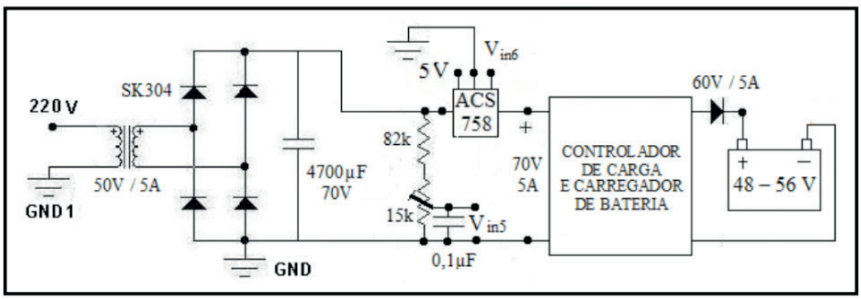


Figura 4 – Carregador de baterias a partir da rede elétrica

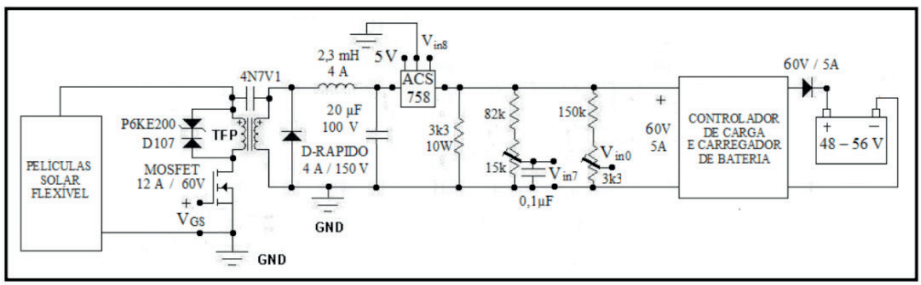


Figura 5 – Conversor CC-CC elevador e para carga das baterias a partir do painel de módulos solar flexíveis

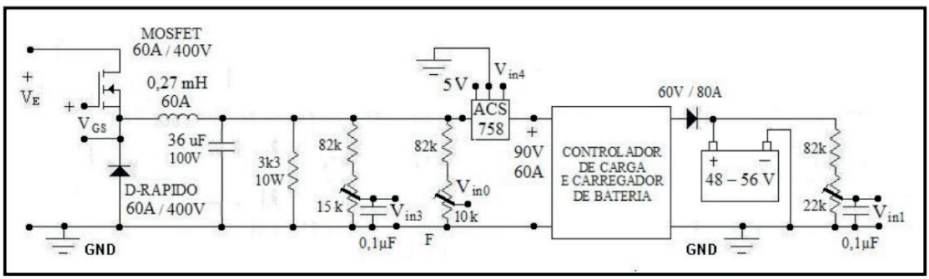


Figura 6 – Conversor CC-CC rebaixador para carga das baterias do gerador à combustão

2.4 Esquema do Inversor

A geração das ondas senoidais de tensão trifásicas é realizada a partir de um inversor trifásico, sendo, portanto, necessário tensão contínua para o barramento CC deste inversor. Assim, a tensão das baterias será de 50 V, a tensão do barramento CC será de 200 V, a tensão de saída do inversor desenvolvido terá saída de 127 V_{RMS} por fase e o transformador terá entrada de 127 V e saída de 220 V por fase. O conversor CC-CC para o barramento CC do Inversor (figura 7) deve ser um elevador e deve ter ganho de 8, sendo, portanto, a configuração de *flayback.*

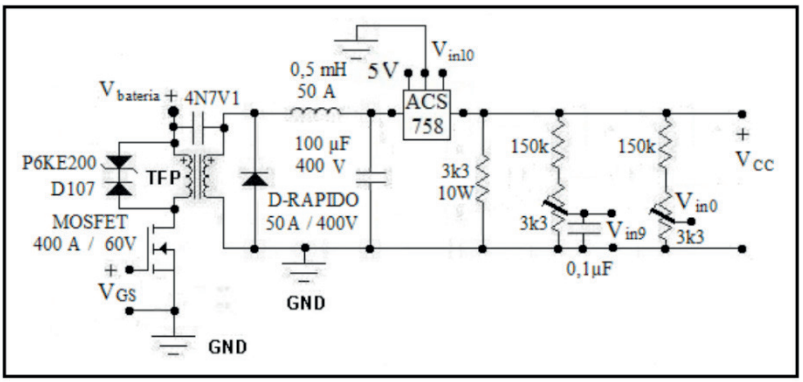


Figura 7 – Esquema Elétrico do Conversor CC-CC Elevador para o Barramento CC do Inversor

O inversor é a partir de um PWM, o qual aproxima largura de pulso de ondas senoidais, conforme mostra a figura 8-a. A figura 8-b mostra o esquema do projeto por fase. O CI IR2112 é utilizado para acionamento de transistores em ponte / série como no circuito do inversor, e faz um desacoplamento do neutro dos transistores da parte de cima do circuito, impedindo que entre em curto com os transistores da parte de baixo. Cita-se que, enquanto os transistores da parte de cima estão conduzindo, aqueles da parte de baixo devem estar cortados. Na figura 8-b os sinais V_{o1} e V_{o2} são originados a partir do microprocessador DSPIC30F2010/SPG para geração dos sinais PWM para os transistores.

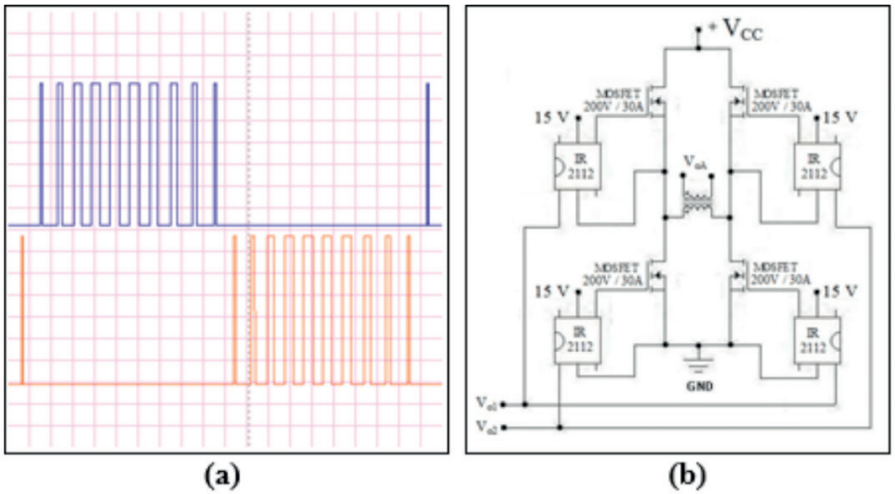


Figura 8 – Inversor de frequência trifásico – (a) modulação por largura de pulso para aproximação de ondas senoidais – (b) circuito elétrico por fase

O trem de pulsos para todos os conversores CC-CC foram gerados a partir de um circuito integrado dedicado, o TL 494, o qual é muito utilizado para circuitos PWM. Para alimentação dos diversos circuitos indicados anteriormente, foi desenvolvida uma placa com 3 fontes CC, de 5,12 e 15 V. Também foi desenvolvida uma segunda placa com o microprocessador PIC16F28A para adequar alguns sinais de Vin e outros controles do veículo.

2.5 Painel de Controle

Os displays de V_{in1} até V_{in10} (figura 9-a) indicam valores diversos de tensão e corrente. Os 5 controladores para carga das baterias solar charge controller, o inversor CFW 08 da WEG, e os displays, serão fixados no gabinete do painel de controle, conforme mostram as figuras 9-b (layout) e 9-c (painel em montagem). As placas eletrônicas desenvolvidas (conversores, inversor, fontes e microprocessadores), e os transformadores serão fixados no interior deste painel. A figura 10-a mostra onde este painel será fixado no veículo, bem como as baterias. As figuras 10-b, 10-c e 10-d mostram fotos detalhadas de algumas partes do Veículo em montagem final.

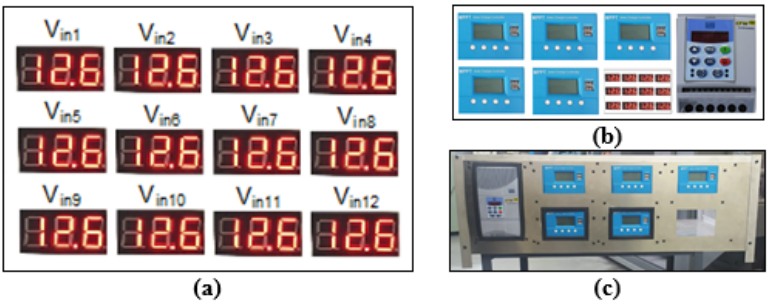


Figura 9 – Painel de Controle e Monitoração – (a) Disposição dos Displays – (b) Lay Out – (c) Parcialmente montado

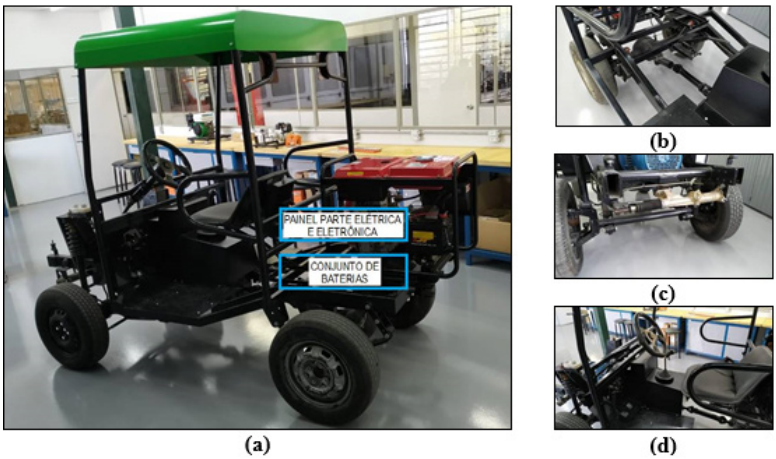


Figura 10 – Detalhamento Montagens do Veículo – (a) Localização do Painel de Controle e Baterias – (b) Transmissão – (c) Suspensão – (d) Direção

3 | RESULTADOS PRELIMINARES

Algumas partes mecânicas, bem como as placas que compõe o painel de controle do veículo elétrico híbrido, apesar de estarem todas projetadas, estão em fase de montagens e testes. Para os testes da carga das baterias pela rede elétrica foi montada uma placa protótipo e testada em bancada, conforme mostra a figura 11-a. Uma placa experimental do conversor CC-CC rebaixador foi montada para testes em baixa tensão e corrente (figura 11-b), ou seja, a partir de componentes de menor potência. Para os testes da placa da carga das baterias pela rede, o transformador (127 / 220 V : 24V+24 V) foi ligado à rede de 127 V, resultando em uma tensão de entrada, na placa de retificação, de 48 V. Após o processo de retificação obteve-se, na saída da placa, uma tensão aproximada de 63 V, pode ser visualizado na figura 14-a. Pode- se observar no display do controlador MPPT um sol com uma seta em direção a uma bateria. Sendo assim o controlador está indicando que o mesmo está efetuando uma carga nas baterias, em um sistema com 4 baterias ligadas

em série.

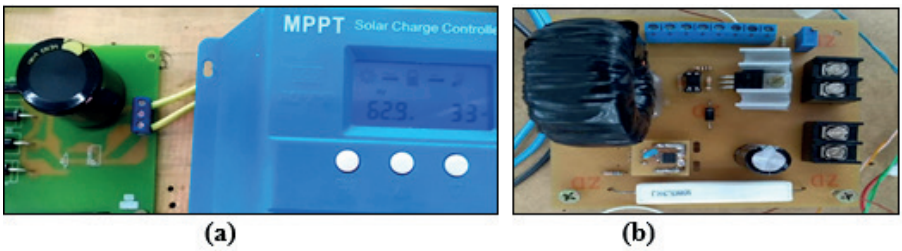


Figura 11 – Placas em Testes – (a) Carregador das Baterias pela Rede – (b) Conversor CC-CC rebaixador

Para os testes da placa preliminar do conversor CC-CC, utilizou-se um gerador digital, capaz de gerar uma onda quadrada, com variação do tempo de ligado e desligado (t_{on} e t_{off}), ou seja, do *duty cicle*, bem como ampla variação da frequência. Uma placa de testes da parte de potência do Inversor foi montada (figura 12). Para a medição da tensão do barramento CC foi utilizado um multímetro portátil ANENG modelo AN870. Para medição da tensão de saída do inversor e do formato de onda, foram utilizados um multímetro de bancada KEYSIGHT modelo U3401A e um osciloscópio RIGOL modelo DS1054Z.

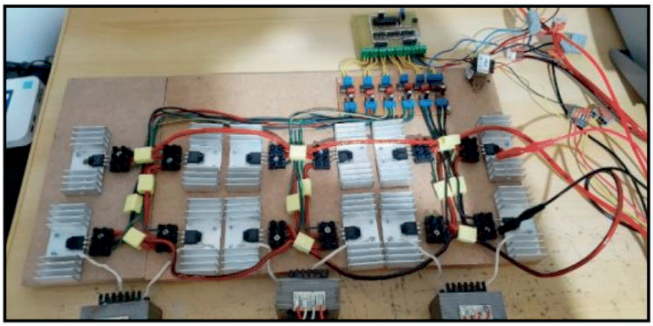


Figura 12 – Setup de teste do inversor

As medições feitas foram do formato de onda da modulação PWM na saída da placa do processador e da tensão de saída do inversor após o filtro de saída. A figura 13-a mostra o formato de onda da saída do inversor. Fase R em amarelo, fase S em azul claro e fase T em roxo. A figura 13-b mostra o formato de onda da saída do inversor mostrando as três fases separadas.



Figura 13 – Formato de onda da saída do inversor – (a) Fase R em amarelo, fase S em azul claro e fase T em roxo – (b) As três fases separadas

4 | CONCLUSÕES

Conforme se pode observar nos resultados indicados, tanto os Conversores CC-CC quanto o inversor funcionaram perfeitamente. No estágio atual do desenvolvimento do projeto, estão sendo montadas as placas definitivas. Após estas serão testadas, fixadas no gabinete do painel de controle, que por sua vez será instalado no veículo. Finalmente o veículo será testado rodando. Cita-se que o motor trifásico, também já foi testado em bancada e o mesmo desenvolver aproximadamente 9 kW. Os resultados dos testes do veículo elétrico híbrido, bem como seu desempenho, velocidade e autonomia serão divulgados em futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luis. **Eficiência Energética: Técnicas de aproveitamento, gestão de recursos e fundamentos**. São Paulo: Érica, 2015. 152 p.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna: volume 2**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012. 485 p. 2 v.

CORREIA, Pedro António Abreu. **Avaliação do desempenho de um carro elétrico com máquina DC e máquina AC**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica-telecomunicações, Universidade da Madeira, Funchal, 2018.

GRUPO DE ENERGIA ESCOLA POLITÉCNICA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – GEPEA. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. 2012.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência**. São Paulo, MCGRAW HILL -, 2011. 504p.

Motores de Combustão Interna: Quarta Edição, Revista e aumentada. 4. ed. Porto: Publindústria, 2013. 473 p.

RISSO, Marcelo Luiz. **O desenvolvimento da indústria de veículos elétricos no Brasil: O papel das políticas públicas**. 2018. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Departamento de Administração - Ppg, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CAPÍTULO 15

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 05/02/2021

Gabriel Silva de Marchi Benedito
FHO | Fundação Hermínio Ometto
Araras – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/4874428781719969

Daniel Augusto Pagi Ferreira
FHO | Fundação Hermínio Ometto
Araras – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/1526589803122442

RESUMO: A preocupação com as situações climáticas e a escassez do petróleo tem feito os veículos elétricos ocuparem um lugar cada vez mais expressivo no mercado automotivo, sendo alvo de muitos estudos e investimentos. Uma das tecnologias mais importantes neste contexto é o processo de frenagem regenerativa, pois promove um melhor aproveitamento energético do sistema e contribui para um aumento da autonomia. Dessa forma, este trabalho apresenta uma simulação computacional comparativa entre veículos elétricos que possuem essa tecnologia e aqueles que não possuem, de maneira a analisar o seu impacto na autonomia. Para a realização dos testes, foi elaborado um código no Octave capaz de simular o alcance de um veículo elétrico à bateria quando submetido em um ciclo de condução, baseando-se em modelos apresentados por Larminie e Lowry (2012) que descrevem o dimensionamento de veículos, baterias e motores. Os resultados obtidos mostram que o emprego do processo de frenagem regenerativa permite um aumento de aproximadamente 9% na autonomia desses veículos. Observou-se que o seu comportamento sofre alterações conforme alguns parâmetros são modificados, possuindo melhores rendimentos quanto maiores são os valores de massa e número de baterias e quanto menores são os valores de coeficiente de arrasto aerodinâmico e área frontal do veículo. Além disso, vale ressaltar que nem sempre o cenário ideal para a frenagem regenerativa é o mesmo para a autonomia do veículo.

PALAVRAS - CHAVE: Veículos elétricos. Frenagem regenerativa. Autonomia veicular.

ABSTRACT: The concern with climatic issues and the scarcity of oil has made electric vehicles increasingly relevant in automotive industry, being the target of many studies and investments. One of the most important technologies in this context is the regenerative braking, as it promotes better energy use of the system and contributes to increase the vehicle range. Thus, this study presents a comparative computer simulation between electric vehicles that have this technology and those that do not, to analyze its impact on the vehicle range. An Octave code was developed to simulate the battery autonomy of an electric vehicle when submitted to two different driving cycles, based on models presented by Larminie and Lowry (2012) for vehicles, batteries and engines sizing. The results obtained shows that the use of the regenerative braking process increases the vehicle range approximately 9%. It was observed that their behavior changes as

some parameters are modified, having better range with the increase of the vehicle mass and the number of batteries, and reducing aerodynamic drag coefficient and frontal area of the vehicle. Moreover, it was observed that the ideal settings for regenerative braking and vehicle range are not necessarily the same.
KEYWORDS: Electric vehicle. Regenerative braking. Vehicle range.

1 | INTRODUÇÃO

Recentemente, discussões a respeito de fontes energéticas aumentaram principalmente pela exiguidade do petróleo e por problemas climáticos oriundos da queima de combustíveis fósseis, se tornaram uma preocupação mundial e ocasionaram uma busca por tecnologias mais sustentáveis (PACHECO, 2006).

Nesse contexto, os veículos elétricos (VE) vêm ganhando maior atenção no mercado atualmente. No Brasil há incentivos à pesquisa criados justamente para aprimoramento da tecnologia a fim de eliminar os problemas por ela enfrentados (PAREDES, 2013).

Os VEs são caracterizados por serem movidos integralmente por energia elétrica. Eles contribuem para uma redução do uso de combustíveis fósseis, eliminam as emissões de gases poluentes e se destacam por possuírem uma maior eficiência energética e uma menor frequência de manutenções quando comparados aos veículos convencionais (GONÇALVES, 2018). Contudo, VEs possuem baixa autonomia quando comparados aos veículos que utilizam motores a combustão interna (MCI). A Frenagem Regenerativa (FR) é uma tecnologia utilizada nos VEs que tem como objetivo amenizar os problemas relacionados à baixa autonomia, permitindo que parte da energia cinética disponível numa desaceleração possa ser armazenada e reutilizada (PAREDES, 2013).

O principal objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo de autonomia entre um veículo elétrico alimentado por baterias (VEB) com e sem FR em dois ciclos de condução diferentes. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica para compreender melhor o funcionamento e a modelagem do carro, da bateria, do motor e dos subsistemas da FR, que serão apresentados a seguir.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A História dos Veículos Elétricos

Embora o uso de MCI como tecnologia de propulsão tenha predominância no mercado automobilístico global há muito tempo, os veículos movidos a motores elétricos sucederam a sua criação (SANTOS, 2009).

De acordo com Ehsani *et al.* (2004), o primeiro VE foi apresentado ao mundo por Gustave Trouvé em 1881. Apenas em 1886 que foi registrada a primeira patente de um veículo com MCI por Karl Friedrich Michael Benz e teve início um período de muita disputa entre os três motores existentes (a vapor, elétrico e a combustão interna), sendo um

marco representativo da Segunda Revolução Industrial (1870 – 1930) devido às inovações tecnológicas desenvolvidas e aplicadas pela indústria automobilística. Vale ressaltar que, em 1889, Ferdinand Porsche foi o responsável por desenvolver o primeiro veículo elétrico híbrido do mundo (BARASSA, 2015).

Segundo Santini (2011), os trinta anos seguintes à década de 1880 ficaram conhecidos como a "Era de Ouro", pois foi caracterizada por uma série de desenvolvimentos tecnológicos em prol dos VEs. A contribuição mais significativa e impactante aos VEs foi a invenção da FR realizada por M.A. Darracq em 1887, pois os tornaram mais competitivos no mercado graças ao aumento de autonomia alcançado (EHSANI *et al.*, 2004).

Apesar desses avanços, os VEs perderam o mercado para os MCI devido a uma série de fatores nos quais os mais relevantes foram os incentivos por parte dos produtores de petróleo no desenvolvimento dos motores a combustão e o barateamento desses veículos proporcionado pela produção em massa empregada por Henry Ford. Esses acontecimentos fizeram com que os problemas até então já enfrentados pelos VEs como a baixa autonomia e o alto custo de venda se tornassem ainda mais prejudiciais (MONTEIRO e MOTTA, 2015).

2.2 A Frenagem Regenerativa em Veículos Elétricos

A FR consiste no reaproveitamento de parte da energia cinética produzida com o movimento de desaceleração do veículo. Essa energia, que em sistemas de freios convencionais é desperdiçada em forma de calor, pode ser armazenada em baterias ou supercapacitores e ficam disponíveis para uso (PAREDES, 2018).

De maneira sucinta, o sistema de propulsão de um VEB é composto de uma bateria, um motor elétrico, um conversor de energia para que sejam fornecidos valores de tensão e corrente adequados e um controlador que tem como função gerenciar o fornecimento de energia. Todo o sistema está interligado com o fluxo de energia e funciona de acordo com o modo de operação do veículo. Em casos de aceleração a bateria fornecerá energia ao motor para movimentar o veículo. Já quando há uma desaceleração, o motor elétrico passa a operar como um gerador e toda a energia recuperada durante a frenagem é enviada à bateria (CAPO, 2016).

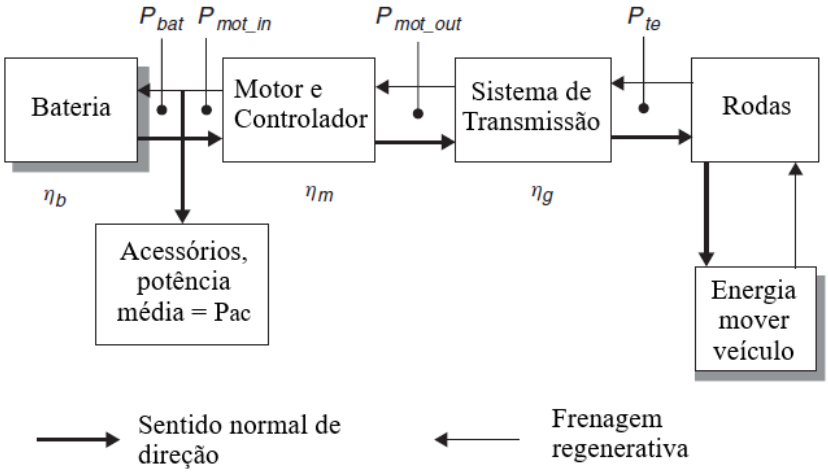


Figura 1 – Fluxo de energia em um veículo elétrico à bateria que possui a FR

Fonte: Adaptado de Larminie e Lowry (2012)

Como a frenagem é fundamental à segurança de um veículo, existem alguns fatores que devem ser levados em consideração quando a tecnologia de FR é adicionada ao processo. As forças de frenagens requeridas durante a desaceleração variam conforme a maneira em que o movimento ocorre, exigindo que elas respeitem determinada intensidade e que sejam distribuídas entre os eixos para que o veículo não perca sua condição de estabilidade (MONTEIRO e MOTTA, 2015). Além disso, em algumas situações o torque de frenagem poderá ser grande o suficiente para que haja uma sobrecarga na máquina elétrica e em todo o sistema eletrônico. Nestes casos, o uso combinado com o freio convencional mecânico é indicado a fim de evitar o mau funcionamento do sistema elétrico e, principalmente, manter a segurança durante a direção (PAREDES, 2013).

2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia

Segundo Paredes (2013), o sistema de armazenamento de energia é composto por dispositivos capazes de armazenar e prover o fornecimento de energia como baterias, supercapacitores, entre outros. Uma estratégia que pode ser utilizada para melhorar tanto a eficiência quanto o desempenho do veículo é fazer o uso conjunto de duas ou mais fontes devido às vantagens que cada uma oferece. Por exemplo, o uso de supercapacitores em paralelo com um conjunto de baterias pode ser benéfico, pois será possível fornecer picos de potência de maneira satisfatória sem que haja um comprometimento da vida útil das baterias (FERREIRA et al, 2007).

2.3.1 Baterias

As baterias são dispositivos capazes de transformar a energia elétrica em energia química durante a carga e de convertê-la novamente em energia elétrica durante a descarga. Os tipos de bateria mais comumente utilizados nos VEs são de chumbo-ácido, níquel-hidreto metálico, íons de lítio, polímero de lítio, entre outros (CHAN, 2007).

Esse componente demanda um olhar criterioso por parte dos desenvolvedores por se tornar o item de maior importância de um VEB, pois são extremamente relevantes ao desempenho do veículo e exercem grande impacto em variáveis como custo, peso e volume (LARMINIE e LOWRY, 2012). Em consequência disso, os VEs possuem um sistema de monitoramento de bateria que tem como função melhorar o funcionamento e a sua vida útil (PAREDES, 2013).

De acordo com Luna Filho (2017), os parâmetros de uma bateria mais relevantes aos sistemas elétricos são:

a) Capacidade da bateria: é a capacidade de armazenamento de energia elétrica de uma bateria;

b) Taxa de carga/descarga: representa a intensidade na qual a corrente é utilizada, sendo a razão entre a capacidade da bateria e o período de carga ou descarga;

c) Estado de carga ou (*State of Charge*): é o percentual de energia armazenada em relação à bateria completamente carregada;

d) Profundidade de descarga ou (*Depth of Discharge*): representa o percentual de energia que foi retirada em relação à bateria completamente carregada;

e) Resistência interna: é a resistência elétrica que a corrente encontra no interior de uma bateria;

f) Tensão de circuito aberto (): é a tensão encontrada nos terminais da bateria.

A Lei de Peukert permite estimar o de uma bateria quando submetida a uma corrente de descarga constante através de uma relação entre a sua capacidade e taxa de descarga. Com esse modelo é possível estudar o comportamento da bateria, visto que quanto maior a velocidade de descarga, menor é a capacidade da bateria. Vale ressaltar que esta Lei não considera o efeito de recuperação de energia (DOERFFEL e SHARKH, 2006). De acordo com Larminie e Lowry (2012), a Capacidade de Peukert é dada pela equação:

$$C_p = I^k \times T \qquad (1)$$

em que I é a corrente, k é o coeficiente de Peukert (dependente do tipo de bateria) e T é o tempo de duração da bateria. Rearranjando esta equação é possível encontrar o tempo de duração de uma bateria quando sujeita a qualquer corrente I.

2.3.2 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido são compostas por células que são associadas para produzir a tensão desejada e são formadas por dois eletrodos – um ânodo (polo negativo) feito de chumbo esponjoso e um cátodo (polo positivo) feito de dióxido de chumbo – que ficam imersos em ácido sulfúrico diluído (ANTUNES, 2018).

Segundo Larminie e Lowry (2012), a V_{oc} destas baterias pode ser representada por:

$$\mathrm{E} = \mathrm{n} \times [2{,}15 - \mathrm{DoD} \times (2{,}15 - 2{,}00)] \quad (2)$$

em que n representa o número de células e *DoD* a profundidade de descarga da bateria (0 para totalmente carregada e 1 para totalmente vazia); A descarga de energia constante de uma bateria pode ser descrita como:

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{E} - \sqrt{\mathrm{E}^2 - 4 \times \mathrm{R} \times \mathrm{P}}}{2 \times \mathrm{R}} \quad (3)$$

em que R é a resistência interna da bateria e P é a potência da bateria.

2.4 Dinâmica Veicular

2.4.1 Esforço de Tração Total

É fundamental encontrar a força de tração de um veículo para modelar o seu desempenho, visto que ela corresponde à força propulsionadora do veículo e, portanto, é a responsável por movimentá-lo. Ela deve ser capaz de superar a todas as resistências e acelerar o veículo (TANAKA, 2013). Como aponta Larminie e Lowry (2012), o esforço de tração total pode ser obtido por:

$$\mathrm{F_{et}} = \mathrm{F_r} + \mathrm{F}_w + \mathrm{F_{inc}} + \mathrm{F_{al}} + \mathrm{F_{a\omega}} \quad (4)$$

em que F_r é a resistência ao rolamento, F_w é a resistência aerodinâmica, F_{inc} é a resistência à inclinação da pista, F_{al} é a força de aceleração linear e F_{aw} é a força de aceleração angular.

2.4.2 Resistência ao Rolamento

Segundo Ehsani *et al.* (2004), o atrito dos pneus com a superfície cria uma força de reação que atua no sentido oposto ao rolamento da roda, exigindo que o torque na roda do veículo seja maior do que a intensidade dessa força para que o veículo se movimente. A força equivalente a essa resistência ao rolamento é denominada por:

$$\mathrm{F_r} = \mu_{\mathrm{rr}} \times \mathrm{P} \times \cos(\alpha) \quad (5)$$

em que μ_{rr} representa o coeficiente de resistência ao rolamento (em função de variáveis dos pneus), o ângulo de inclinação da pista e o peso do veículo.

2.4.3 Resistência Aerodinâmica

Quando o veículo se movimenta há o surgimento de forças aerodinâmicas contrárias ao seu movimento. Essas forças originam de duas fontes: o atrito viscoso, devido às colisões entre moléculas de ar que possuem diferentes velocidades ocasionadas pelo deslocamento da massa de ar próxima ao veículo e o gradiente de pressão em razão do formato do veículo, que produz uma zona de alta pressão na frente e uma zona de baixa pressão na traseira do veículo (SOUZA, 2010). Ainda em Souza (2010), a força de arrasto aerodinâmico pode ser descrita pela equação:

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_d \times v^2 \qquad (6)$$

em que C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico (determinado de maneira empírica), A é a área frontal do veículo, ρ é a densidade do ar e v é a velocidade do veículo.

2.4.4 Resistência à inclinação da pista

De acordo com Ehsani *et al.* (2004), quando existe uma inclinação na pista de rodagem, o próprio peso do veículo produz uma força que tende a dificultar, caso seja positiva (aclive), ou ajudar, quando negativa (declive), o seu movimento.

A Figura 2 exemplifica o comportamento das forças num plano inclinado, e a força de resistência à inclinação da pista pode ser escrita como:

$$F_{inc} = M \times g \times \sin(\alpha) \qquad (7)$$

em que M é a massa do veículo, g é a força gravitacional e α é o ângulo de inclinação da pista.

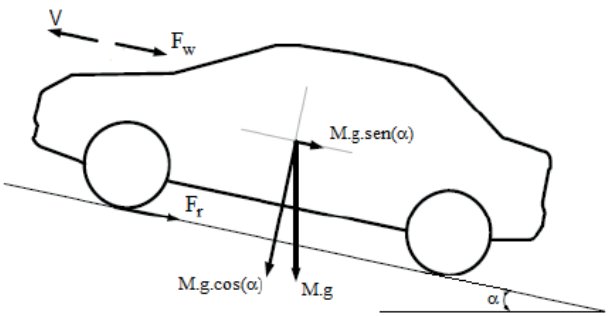


Figura 2 – Atuação de forças em um veículo

Fonte: Adaptado de Tanaka (2013)

2.4.5 Forças de Aceleração Linear e Angular

Como aponta Larminie e Lowry (2012), uma força deverá ser aplicada para que a aceleração linear do veículo aconteça devido à constante mudança de velocidade do veículo. No entanto, devem-se considerar as forças necessárias ao movimento rápido das partes giratórias para melhorar a precisão dos cálculos. O componente mais relevante desse aspecto é o motor elétrico, justamente por causa das altas velocidades angulares. A equação que define essa força de aceleração angular é:

$$F_{a\omega} = \frac{I \times G^2 \times a}{\eta_g \times r^2} \qquad (8)$$

em que I representa o momento de inércia do rotor do motor, G a razão de engrenamento do sistema motor-eixo, a a aceleração linear, N_g a eficiência do sistema de transmissão e r o raio do pneu. Porém, como forma de simplificação satisfatória, é razoável desconsiderar o termo $F_{a\omega}$ da equação do esforço de tração total e realizar um aumento de 5% na massa do veículo.

2.5 Motores Elétricos DC e Sua Eficiência

De acordo com Larminie e Lowry (2012), os VEs podem utilizar diferentes tipos de motores elétricos. No entanto, a maioria das perdas em motores elétricos de corrente contínua podem ser calculadas da mesma maneira independentemente do modelo escolhido e são divididas em quatro principais tipos:

a) Perdas no cobre: causadas pela resistência elétrica dos fios do motor. Sendo Kc uma constante que depende da resistência das escovas, da bobina e do fluxo magnético e T o torque fornecido pelo motor, elas são descritas por:

$$\text{Perdas no cobre} = k_c T^2 \qquad (9)$$

b) Perdas no ferro: ocasionadas por efeitos magnéticos que acontecem principalmente no rotor do motor devido às mudanças dos campos magnéticos necessárias para a sua rotação. Com K_f sendo um coeficiente dependente de fatores relacionados à intensidade do campo magnético e ω a velocidade angular do motor, essas perdas podem ser representadas por:

$$\text{Perdas no ferro} = k_f \omega \qquad (10)$$

c) Perdas por vento: provocada pela resistência aerodinâmica encontrada pelo rotor, na qual K_v é uma constante que depende do seu tamanho e formato.

$$\text{Perdas por vento} = k_v \omega^3 \qquad (11)$$

d) Demais perdas: são aquelas relacionadas ao próprio funcionamento do sistema. Faz referência, por exemplo, à corrente requerida para manter o campo magnético

ou à energia necessária para manter os circuitos eletrônicos em operação. Elas são representadas por uma constante 'C'.

Todas as principais perdas de motores elétricos devem ser consideradas no cálculo de sua eficiência, podendo ser encontrada através da seguinte equação:

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_f \omega + k_v \omega^3 + C} \qquad (12)$$

2.6 Ciclos de Condução (*driving cycles*)

Driving cycles são criados para auxiliar o desenvolvimento de novos veículos e contribuem para a verificação de inúmeros aspectos como consumo de energia e emissão de poluentes. Este instrumento é composto por uma série de dados que representam a velocidade do veículo no tempo, agindo como um modelo de representatividade da via (PFRIEM e GAUTERIN, 2016).

A sua principal utilização está nas simulações de veículos, nas quais seus sistemas de propulsão podem ser reproduzidos de maneira a permitir um estudo e previsão do desempenho de motores, transmissões, baterias, entre outros. Além disso, o uso de ciclos de condução tem como benefício à redução dos custos de testes de rua e de seu tempo de execução (MONTEIRO e MOTTA, 2015).

3 I METODOLOGIA

O impacto na autonomia obtido com o emprego da FR será analisado por meio de simulações computacionais comparativas entre veículos que utilizam e que não a utilizam em sua construção. Além disso, será verificado o seu comportamento conforme algumas das variáveis da simulação como massa, coeficiente de arrasto aerodinâmico, área frontal do veículo e número de baterias são alteradas. A partir das equações que descrevem o dimensionamento de veículos, baterias e motores apresentadas por Larminie e Lowry (2012), foi desenvolvido um código no Octave capaz de simular o alcance de um VEB quando submetido a um ciclo de condução.

O veículo utilizado nos testes foi o EV1 da GM que possui um motor elétrico de indução trifásico de 102kW alimentado por um *pack* de 26 baterias de chumbo-ácido de 18,7kWh, sendo capaz de atingir uma velocidade máxima de 128 km/h. Alguns parâmetros relevantes e que foram utilizados durante as simulações estão organizados na Tabela 1.

Item	Valor	Item	Valor
Massa [kg]	1500	Número de células da bateria	156
Área frontal [m²]	1,8	Capacidade da bateria [Ah]	60
Coeficiente de resistência ao rolamento	0,0048	Resistência interna da bateria	0,022
Coeficiente de arrasto aerodinâmico	0,19	Coeficiente de Peukert	1,12
Eficiência da transmissão mecânica	0,95	k_c	0,3
Relação de engrenagem	11:1	k_f	0,01
Raio do pneu [m]	0,3	k_v	$5{,}0 \times 10^{-6}$
		C	600

Tabela 1 – Parâmetros do GM EV1

Fonte: Elaborado pelo autor extraído de Larminie e Lowry (2012)

Durante as simulações foram utilizados dois ciclos de condução: o adotado pela Norma brasileira ABNT/NBR 6601, FTP-75 e o Fleet-BEV, o qual foi desenvolvido exclusivamente para VEB, cujas principais características são apresentadas na Tabela 2.

Ciclo de condução	Distância [m]	Duração [s]	Velocidade média [km/h]	Velocidade máxima [km/h]
FTP-75	17767	1874	34,12	91,25
Fleet-BEV	5828	783	26,7	78

Tabela 2 – Características relevantes dos ciclos de condução

Fonte: Adaptado do site *Envinromental Protection Agency* (EPA) e PFRIM e GAUTERIN (2016)

Para encontrar a autonomia do veículo o programa calcula os valores de e de distância percorrida até que o SoC atinja um nível crítico de 20%. Primeiramente carregam-se todos os parâmetros e, então, o veículo é posto em um ciclo de condução. A partir disso o código segue o fluxograma da Figura 3.

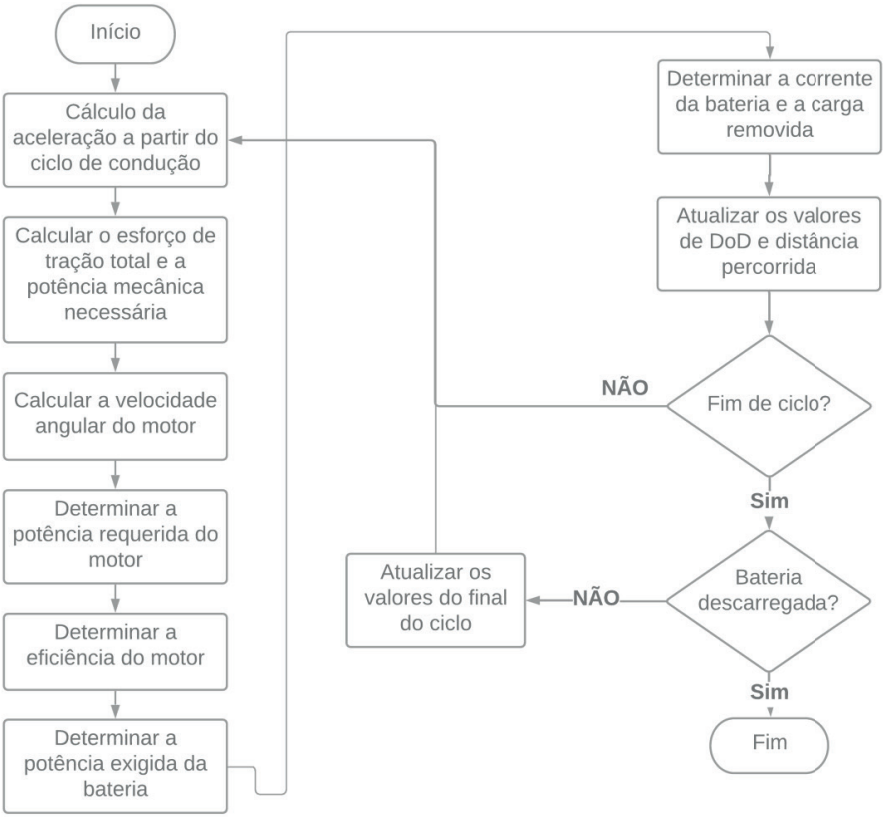


Figura 3 – Fluxograma do teste de autonomia

Fonte: Adaptado de Larminie e Lowry (2012)

Como forma de simplificação adotaram-se uma potência média dos acessórios constante e igual a 250W e a inclinação de superfície da pista como igual a 0º. Foi adotada uma taxa de recuperação de energia de 50%, na qual, segundo Larminie e Lowry (2012), é o máximo possível pela FR na prática.

4 I RESULTADOS

O primeiro teste, apresentado na Figura 4, analisa o comportamento do EV1 e da FR em diferentes ciclos de condução. O alcance obtido para o ciclo Fleet-BEV (Figura 4ª) sem o uso da FR foi de 128,59km e, com uso, de 140,44km, enquanto no ciclo FTP-75 (Figura 4b) a autonomia foi de 136,92 para 149,29 km.

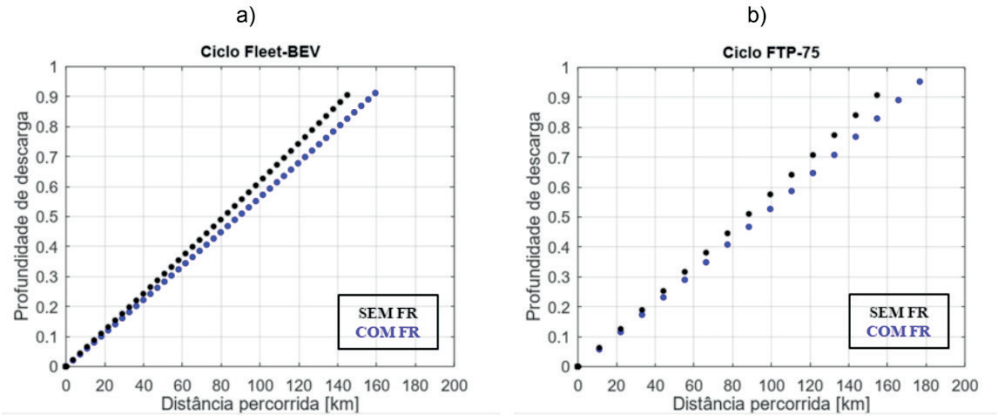


Figura 4 – Autonomia do veículo nos ciclos A e B

Fonte: O Autor

Posteriormente, como mostra a Figura 5, foi feita uma variação nos valores de massa do veículo para verificar o impacto do peso. Observou-se que alterando os valores de massa do veículo (de 1000 a 2000 kg) é possível melhorar o desempenho da FR em até 3,82%, podendo ganhar até 86,34km de autonomia.

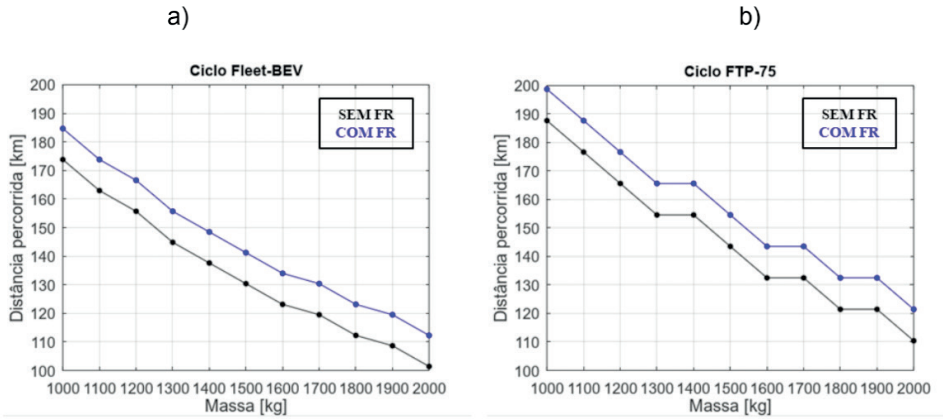


Figura 5 – Autonomia com a variação da massa do veículo nos ciclos A e B

Fonte: O Autor

A análise da resposta do veículo quando submetido a diferentes áreas frontais é mostrado na Figura 6. Viu-se que a autonomia diminui conforme a área se torna maior. Porém, ao contrário da massa, o rendimento da FR é maior quanto menor for esse

parâmetro, possibilitando um ganho de até 9,43% de autonomia.

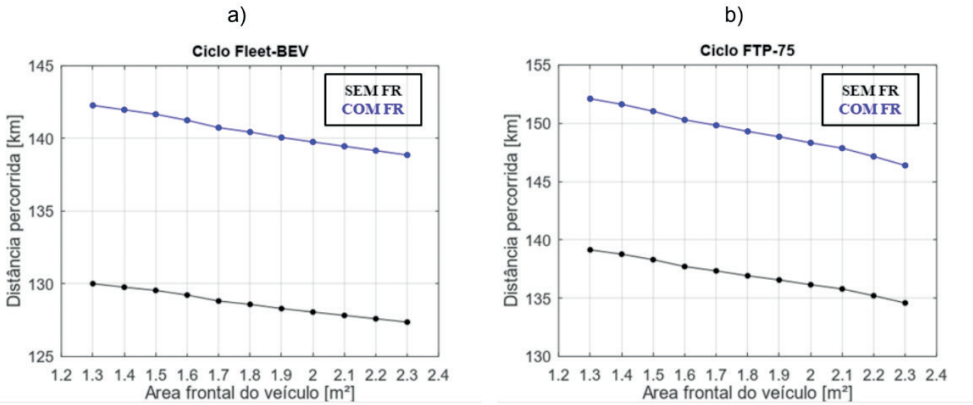


Figura 6 – Autonomia modificando a área frontal do veículo nos ciclos A e B

Fonte: O Autor

A Figura 7 revela o comportamento da autonomia quando são feitas alterações no coeficiente de arrasto aerodinâmico. É possível ver que em ambos os ciclos a resposta é bem similar, diminuindo o seu alcance conforme o coeficiente aumenta. Assim como na simulação anterior, o desempenho da FR é melhor quanto menor for esse coeficiente, sendo possível percorrer até 17,12km a mais com o seu uso.

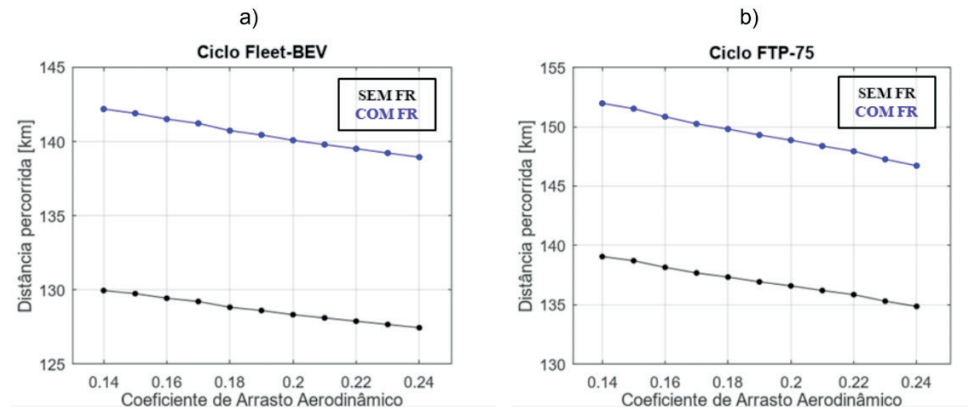


Figura 7 – Autonomia em relação ao coeficiente de arrasto aerodinâmico nos ciclos A e B

Fonte: O Autor

Outro parâmetro analisado foi o número de baterias. Vale ressaltar que a massa do veículo também se altera conforme o número de baterias aumenta. O resultado é apresentado a seguir e mostra que, mesmo com o aumento relativo da massa, a autonomia do veículo projeta um crescimento bastante expressivo, sendo possível percorrer até 265km com essas mudanças. A FR também apresentou melhor desempenho quanto maior o número de baterias.

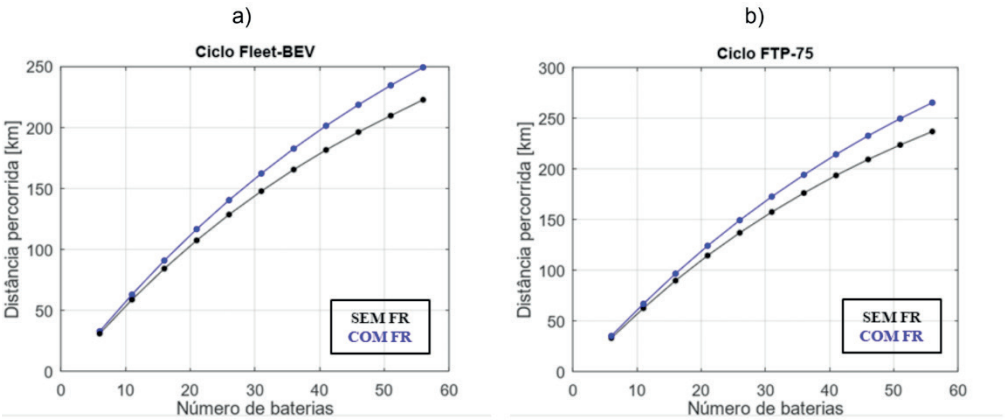


Figura 8 – Autonomia variando o número de baterias nos ciclos A e B

Fonte: O Autor

5 | DISCUSSÕES

Uma análise comparativa foi desenvolvida após a obtenção dos resultados das simulações e as tabelas a seguir mostram um resumo das respostas do processo de FR e do veículo em relação às diversas variações em alguns de seus parâmetros.

É possível observar na Tabela 3 que a escolha do ciclo de condução praticamente não afeta o comportamento da FR, apesar de influenciar na autonomia do veículo dada às próprias características do ciclo que o torna mais, ou menos, agressivo.

Analisando a Tabela 4 e a Tabela 5 é notável que, de todas as alterações, os parâmetros que mais impactaram nos resultados foram os relacionados ao aumento de massa e do número de baterias do veículo, no qual o desempenho da FR pode ser praticamente dobrado, de 6,11 para 12,03 %, assim como a autonomia do veículo que foi de 149,29 (original) para 265,35 km (aumento de baterias).

Ciclo de condução	Parâmetro alterado	Autonomia (km)		Aumento com a FR (%)	Ganho autonomia máximo (km)	Máximo desempenho da FR (%)
		Sem FR	Com FR			
FTP-75	Original	136,92	149,29	9,03	12,37	0,18
Fleet-BEV	Original	128,59	140,44	9,22	11,85	

Tabela 3 – Comparativo entre os ciclos de condução

Fonte: O Autor

Parâmetro alterado	Autonomia (km)		Aumento com a FR (%)	Ganho autonomia máximo (km)	Máximo desempenho da FR (%)
	Sem FR	Com FR			
Massa (1000 kg)	182,12	194,54	6,82	86,34	3,66
Massa (2000 kg)	108,2	119,54	10,48		
Área (1,3 m²)	139,14	152,1	9,31	17,51	0,55
Área (2,3 m²)	134,59	146,38	8,76		
C_d (0,14)	139,05	151,97	9,29	17,12	0,50
C_d (0,24)	134,85	146,71	8,79		
Número de baterias (6)	33,07	35,09	6,11	232,28	5,92
Número de baterias (56)	236,86	265,35	12,03		

Tabela 4 – Resultados obtidos no ciclo FTP-75

Fonte: O Autor

Parâmetro alterado	Autonomia (km)		Aumento com a FR (%)	Ganho autonomia máximo (km)	Máximo desempenho da FR (%)
	Sem FR	Com FR			
Massa (1000 kg)	172,32	184,22	6,91	82,94	3,82
Massa (2000 kg)	101,28	112,14	10,72		
Área (1,3 m²)	130,01	142,27	9,43	14,90	0,41
Área (2,3 m²)	127,37	138,86	9,02		
C_d (0,14)	129,94	142,19	9,43	14,76	0,40
C_d (0,24)	127,43	138,94	9,03		
Número de baterias (6)	30,86	32,69	5,93	218,62	6,02
Número de baterias (56)	222,85	249,48	11,95		

Tabela 5 – Resultados obtidos no ciclo Fleet-BEV

Fonte: O Autor

6 | CONCLUSÕES

Conclui-se que o emprego da frenagem regenerativa, por si só, permitiu um aumento de aproximadamente 9% na autonomia de um VEB. Além disso, a tecnologia apresentou maior rendimento quando os valores de área frontal e coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo foram diminuídos e quando os valores de massa e número de baterias foram aumentados. As alterações que obtiveram melhores resultados foram às relacionadas ao peso do veículo, isso porque quanto maior a massa, maior a energia cinética produzida no movimento e maior à energia recuperada na desaceleração. Também foi visto que a escolha do ciclo de condução, apesar de influenciar nos valores obtidos, não trouxe diferenças significativas nos resultados.

Algo interessante de analisar é que o cenário ideal para a FR nem sempre é o melhor quando se busca aumentar o alcance do veículo. Isso porque, em algumas condições, como é o caso do aumento da massa, as forças necessárias para o movimento do veículo aumentam consideravelmente e exigem maiores potências, aumentando a solicitação da bateria. O melhor resultado para a autonomia do veículo foi obtido com o aumento do número de baterias, revelando o impacto que a escolha e o dimensionamento da bateria têm no desenvolvimento dos VEB.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, P. D. R. **Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios.** 2018. 73 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, SC.

BARASSA, E. **Trajetória tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil**. 2015. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP.

CAPO, P. I. M. **Modelagem matemática e simulação de um veículo elétrico movido a células de combustível**. 2016. 53 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC.

CHAN, C. C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings of the IEEE**. v. 95, n. 4, p. 704-718, abr. 2007.

DOERFFEL, D.; SHARKH, S. A. A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries. **Journal of power sources**, v. 155, n. 2, p. 395-400, jun. 2006.

EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S. E.; EMADI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 1ª. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, ISBN: 0-8493-3154-4, 2004.

FERREIRA, A. A.; POMILIO, J. A.; DA SILVA, E. P.; CAMBRA, D. V. P. **Metodologia para dimensionar múltiplas fontes de suprimento de energia de veículos elétricos**. In: VE 2007 - 5° Seminário e Exposição de Veículos Elétricos. 2007.

GONÇALVES, C. C. **Veículos Híbridos: desempenho, eficiência energética e dinâmica veicular**. 2018. 20 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Hermínio Ometto, Araras, SP.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle Technology Explained**. 2. ed. John Wiley & Sons, ISBN 978-1-119-94273-3, 2012.

LUNA FILHO, G. J. **Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM**. 2017. 68p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Faculdade de Engenharia Elétrica, Recife, PE.

MONTEIRO, B. C. R.; MOTTA, L. P. **Frenagem Regenerativa**. 2015. 110 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

PACHECO, F. Economia em destaque: energias renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**: SEI, Salvador, v. 149, n. 1, p. 4-11, out. 2006.

PAREDES, M. G. S. P. **Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico Acionado por Motor de Indução: Estudo, Simulação e Verificação Experimental**. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP.

PAREDES, M. G. S. P. **Study of electric vehicle modeling and strategy of torque control for regenerative and anti-lock braking systems**. 2018. 111 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP.

PFRIEM, M; GAUTERIN, F. Development of real-world driving cycles for battery electric vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 8, n. 1, p. 14-24, jun. 2016.

SANTINI, D. J. Electric Vehicle Waves of History: Lessons Learned about Market Deployment of Electric Vehicles, **Electric Vehicles: The Benefits and Barriers**, Dr. Seref Soylu (Ed.), ISBN: 978-953-307-287-6, InTech. 2011.

SANTOS, A. H. C. **Uma contribuição ao estudo dos freios de atrito para aplicação em frenagem regenerativa**. 2009. 173 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SOUZA, R. B. **Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos**. 2010. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

TANAKA, C. N. **Metodologia do dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Ciências, São Paulo, SP.

CAPÍTULO 16

PATH PLANNING COLLISION AVOIDANCE USING REINFORCEMENT LEARNING

Data de aceite: 01/05/2021
Data da submissão: 28/01/2021

Josias Guimarães Batista
IFCE - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - Fortaleza, CE
http://lattes.cnpq.br/6944387012287863

Emerson Verar Aragão Dias
IFCE - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - Fortaleza, CE
http://lattes.cnpq.br/9745410450918258

Felipe José de Sousa Vasconcelos
UFC - Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, CE

Kaio Martins Ramos
UFC - Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, CE
http://lattes.cnpq.br/0726258678682283

Darielson Araújo de Souza
UFC - Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, CE
http://lattes.cnpq.br/0544245068917092

José Leonardo Nunes da Silva
IFCE - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará - Fortaleza, CE
http://lattes.cnpq.br/8003929415977802

ABSTRACT: Industrial robots have grown over the years making production systems more and more efficient, requiring the need for efficient trajectory generation algorithms that optimize and, if possible, generate collision-free trajectories without interrupting the production process. In this work is presented the use of Reinforcement Learning (RL), based on the Q-Learning algorithm, in the trajectory generation of a robotic manipulator and also a comparison of its use with and without constraints of the manipulator kinematics, in order to generate collision free trajectories. The results of the simulations are presented with respect to the efficiency of the algorithm and its use in trajectory generation, a comparison of the computational cost for the use of constraints is also presented.
KEYWORDS: Path Planning, Collision Avoidance, Reinforcement Learning, Robotic Manipulator, Trajectory Generation.

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA LIVRE DE COLISÃO UTILIZANDO APRENDIZAGEM POR REFORÇO

RESUMO: Os robôs industriais têm crescido ao longo dos anos tornando os sistemas de produção cada vez mais eficientes, exigindo a necessidade de algoritmos de geração de trajetórias eficientes que otimizem e, se possível, gerem trajetórias livres de colisão sem interromper o processo de produção. Neste trabalho é apresentado o uso da Aprendizagem por Reforço (AR), baseado no algoritmo *Q-Learning*, na geração de trajetórias de um manipulador robótico e também uma comparação de seu uso com e sem restrições da cinemática do manipulador, a fim de gerar trajetórias livres de colisão. Os resultados das simulações são apresentados com relação

à eficiência do algoritmo e seu uso na geração de trajetórias, uma comparação do custo computacional para o uso de restrições também é apresentada.

PALAVRAS - CHAVE: Planejamento de Caminho, Prevenção de Colisão, Aprendizagem por Reforço, Manipulador Robótico, Geração de Trajetória.

1 | INTRODUCTION

The industry has found in automation an important ally for the modernization and growth of its activities. The use of robots has increased exponentially in order to perform tasks. In fact, the use of robots with manipulation functions has shown significant growth in the context of industrial production. The aforementioned diffusion of robots in an industrial environment has provided, over the years, that several methods were developed in order to monitor and to control mobile or manipulator robots, giving them the ability to operate in environments that are dangerous to humans (Pinto et al., 2014).

In this sense, optimization becomes a key part, since it is necessary to complete tasks with some desired characteristics, such as minimum time, shorter trajectory, minimal wear of the mechanical parts, among others. Thus, the trajectory performed by the robot is extremely important. In most cases, the cost functions, which are minimized during the optimization process, will have some kind of robot model as a component. This makes them applicable only for a given robot model and sometimes does not apply to be developed and implemented in other robot models (Csiszar, 2016).

The trajectory generation refers to a point in the workspace of the manipulator that can be translated into suitable conditions for a point in the joint space. The problem is to take the manipulator to the specified position, regardless of the initial position and the environment variables. This problem is more generally defined as robot navigation (Sciavicco et al., 1997). Trajectory planning consists of determining a curve in the workspace, connecting the desired, initial and final position of the actuator, avoiding any obstacle. The union of positions in the Cartesian space defines two types of profiles for linear and circular displacements (Khatib, 1986), (Batista et al., 2020b), (Batista et al., 2018).

Based on these concepts, the present work aims to generate the trajectory of a robotic manipulator using Reinforcement Learning (RL), the learning algorithm used is *QLearning*. The algorithm is used to generate trajectory in an environment where some obstacles are considered and the trajectories generated must be collision free.

This paper is organized as follows. Section 2 provides some information about the robotic manipulator and presents the model of the forward and inverse kinematics of the same. Section 3 presents the use of RL and the Q-Learning algorithm used. The algorithm simulation is presented in Section 4. Finally, the conclusions and future work are mentioned in Section 5.

2 | LITERATURE REVIEW

The Q-Learning algorithm is a popular method of RL, and is used for collision prevention where an optimal action-state policy is calculated based on the Markov Decision Process (MDP). The Q-Learning is used to train robots to reach a certain target point, moving through obstacles and avoiding collisions with them. The actions considered are discrete and correspond to moving and rotating in different directions. However, the movement of the robot does not seem natural due to discrete control actions. In addition, a simplistic reward function that depends only on actions taken and collision events should be used (Shim and Li, 2017).

RL is a popular area of research, widely used in several areas such as manufacturing technology, multi-agent technology or computer vision. Robotics RL is often applied to wheel control mobile robots, manipulating robots, or humanoid robots. The Q-Learning algorithm was used as a trajectory generator to reach a target and implemented in an industrial manipulator robot (Miljkovi´c et al., 2013).

In Park et al. (2007), real-time path planning is proposed, combining Probabilistic Roadmap (PRM) and RL to deal with uncertain dynamic environments and similar environments. A series of experiments demonstrate that the proposed hybrid path planning can generate a collision-free path even for dynamic environments in which objects block the pre-planned global path. It is also shown that hybrid path planning can adapt to similar environments previously learned without significant additional learning.

In Gu et al. (2017) it was presented that a recent RL algorithm based on training off-policy of Q functions can switch to complex 3D manipulation tasks and learn deep neural network policies with sufficient efficiency to train in physical robots real. It was shown that training times can be further reduced by parallelizing the algorithm on several robots that group their policy updates asynchronously. The paper presents an experimental evaluation and shows that the method can learn a variety of 3D manipulation skills in simulation and a complex door opening skill in real robots.

In the work from Nair and Supriya (2018), an approach called Modified Temporal Difference Learning for path planning and obstacle avoidance was proposed for static obstacles. The algorithm was developed in MATLAB software and path planning was implemented in a 4 × 4 grid environment. A GUI for the same is created, which access the user inputs like obstacle number, positions and type. The developed algorithm was compared with the conventional path planning Dijkstra's algorithm in the same environment. It was observed that computational complexity was less in the proposed approach compared to the conventional method.

In Jing et al. (2018) was propose a novel computational framework to automatically generate efficient robotic path online for surface/shape inspection application. Within the computational framework, a MDP formulation was proposed for the coverage planning

problem in the industrial surface inspection with a robotic manipulator. A reinforcement learning-based search algorithm was proposed in the computational framework to generate planning policy online with the MDP formulation of the robotic inspection problem for robotic inspection applications. It was observed that the proposed method could automatically generate the inspection path online for different target objects to meet the coverage requirement, with the presence of pose variation of the target object.

3 | ROBOTIC MANIPULATOR

The manipulator used in this work is called *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA). He is a robot that has four degrees of freedom (DOF). Considering the first two joints from the base, it is noted that its workspace is the horizontal type (XY). As the joints revolve around vertical axes in a rotational manner it possible to make an analogy to planar robots of two DOF. Therefore, for this study only two DOF are needed. Figure 1 shows an image of the robot.

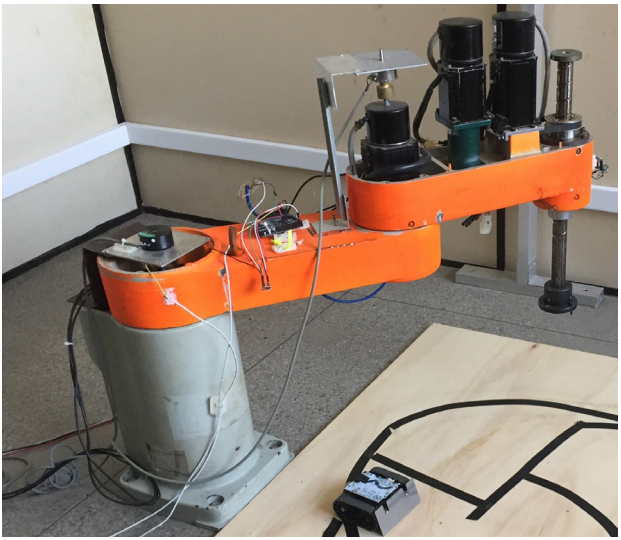


Figure 1. SCARA robotic manipulator.

3.1 Kinematics Model

The robot kinematics is defined as the study of its movement in relation to a reference system. Thus, it is about the analytical description of the robot spatial movement as a function of time, and in particular of the relationships between the position and orientation of its tool with the values that make its articular coordinates. The problem of direct kinematics

is to determine the position and orientation of the manipulator actuator, in relation to a fixed reference coordinate system, known the joint values; the problem of inverse kinematics solves the configuration that the robot must adopt for a position and orientation of the known extreme (Romano, 2002).

3.2 Forward kinematics

In order to define the forward kinematics model, the Denavit-Hartenberg (DH) convention and the coordinator system of the manipulator, which are shown in Figure 2, are used. Thus, the needed parameters of angle and size can be selected (Hartenberg and Denavit, 1964).

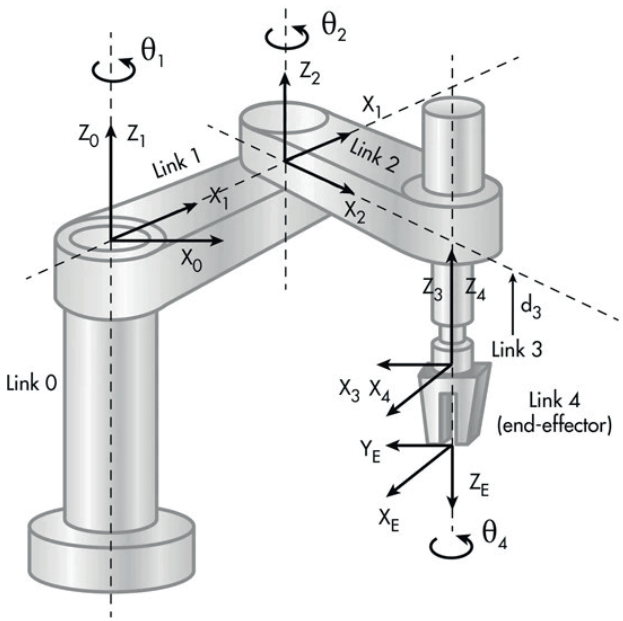


Figure 2. Robot joint coordinate systems SCARA Gonzalez (2017).

From the DH parameters the homogeneous transformation matrices of the coordinate systems are formed. These matrices are used in conjunction with the comparison of the geometric shape of the robot in order to determine the position of its end-effector in the workspace through the coordinates in the joint space as described by the equations

$$P_x = 0.35\cos(\theta 1) + 0.30\cos(\theta 1 + \theta 2) \quad (1)$$

$$P_y = 0.35\sin(\theta 1) + 0.30\sin(\theta 1 + \theta 2) \quad (2)$$

The equations (1) and (2) represent the solution to the problem of forward kinematics for the SCARA manipulator.

3.3 Inverse kinematics

The inverse kinematics is intended to solve a configuration that the robot must adopt in relation to the position and orientation of a known point. A simple way to solve this problem is to use the geometric method where is possible to determine the value of the joint angle, in order to correctly position the manipulator so that the trajectories in the joint space can be generated (Batista et al., 2020a).

From the direct kinematics equations (1) and (2) and applying some trigonometric transformations, one may find the inverse kinematics equations given by:

$$\theta_1 = tan^{-1}\left[\frac{P_y(L_1+L_2\cos(\theta_2)-P_xL_2\sin(\theta_2))}{P_x(L_1+L_2\cos(\theta_2)-P_yL_2\sin(\theta_2))}\right], \quad (3)$$

$$\theta_2 = cos^{-1}\left(\frac{P_x^2+P_y^2-L_1^2-L_2^2}{2L_1L_2}\right), \quad (4)$$

where L_1 = 0.35 m and L_2 = 0.30 m are the values of the lengths of each joint of the manipulator as shown in Figure 2.

The equations (3) and (4) are the solutions to the SCARA manipulator inverse kinematics problem and are used to generate its trajectory.

4 | USING OF RL IN THE GENERATION OF TRAJECTORIES

The RL is an approach that can be used to learn the robots movements, based on feedback received from the environment. The basic idea is inspired by natural learning, the way animals (including humans) learn. This technique involves several different attempts to solve a problem for later verification. When good results occur, the tendency is to repeat the behavior; if the resulting responses are not satisfactory, the direction to be followed is to avoid them (Sutton and Barto, 1998). In RL, the robot tries different actions (in fact, all the actions at its disposal) in all states in which it enters. For each action, there is continuous monitoring, so that all information is stored in some type of representation (usually, some type of table or matrix).

The RL theory is based on Markovian decision-making processes, although its ideas and methods can be extended and applied to more general applications and processes. An environment satisfies Markov property if its state summarizes the past compactly, without losing the ability to predict the future. That is, one can predict what the next state and the

next expected reward will be, given the current state and action (Sutton and Barto, 1998). A Markov process is a sequence of states, with the property that any future state value prediction will depend only on the current state and action, and not on the sequence of past states.

A Markovian decision process is defined by a set h*S,A,P,R*i, in which one have: the finite set of states *S* of the system, the finite number of actions *A*, and a *P* state transition model, which maps the state-action pairs into a probability distribution over the set of states, and finally, a *R* reward function, which specifies the reinforcement. The agent receives for choosing a particular action $a \epsilon A$ in the state $s \epsilon S$. The state *s* and *a* are the current actions that determine (i) the next state s^0 according to the probability $P(s^0|s,a)$, and (ii) the reward $r(s,a)$ associated. Figure 3 shows the generic structure of the RL.

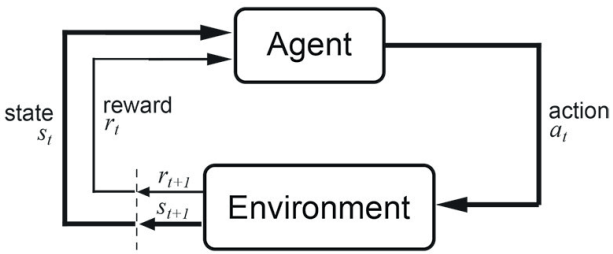


Figure 3. Generic structure of the RL Sutton and Barto (1998).

4.1 Q-Learning

In the RL algorithm used here, the robot and the environment interact in a discrete sequence of steps in time.

The state and the action at a given moment determine the probability distribution for the state s_{t+1} and the reinforcement r_t. The purpose of the robot is usually to choose actions in order to maximize a discounted sum of subsequent reinforcements:

$$r_t = \sum_{k=0}^{T} \gamma^k r_{t+k} \qquad (5)$$

The actions are selected by the robot from a function state (control policy) $\pi : S \rightarrow A$. The value of utility of a state, given a policy is the expected reinforcement starting from the following state and following the policy:

$$\mathrm{V}^{\pi}(\mathrm{s}) = E_{\pi}(\mathrm{Rt}|s_t = \mathrm{s}) \qquad (6)$$

and the optimal policy of actions is that sequence that maximizes the value of the state:

$$V^*(s) = \max_{\pi} V^{\pi}(s) \quad (7)$$

There is always at least one optimal policy that produces the maximum utility value in all states $s \in S$. Alongside these two state value functions, there are two share value functions:

$$Q^{\pi}(s, a) = E_{\pi}(R_t | s_t = s, a_t = a) \quad (8)$$

and

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} Q^{\pi}(s,a) \quad (9)$$

From Q^8, you can determine an optimal policy by making

$$\pi^*(S_t) = \arg\max_{a} Q^{\pi}(s,a) \quad (10)$$

Therefore, Q-Learning is an algorithm that allows one to automatically establish an action policy in a interactive. The algorithm converges to an optimal control procedure, when the *Q* state-action pair learning hypothesis is represented by a complete table containing the information value of each pair (Sutton and Barto, 1998). Convergence occurs both in deterministic and non-deterministic MDP. The Q-learning algorithm learns an optimal assessment function over the entire state-action pair space $S \times A$ (Ribeiro, 2002).

The function $Q(s,a)$ rewards the future action by choosing the action *a* in the state *s*, and is learned through trial and error according to the following equation

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha[r_t + \gamma V_t(s_{t+1}) - Q_{t+1}(s_t, a_{t)}] \quad (11)$$

where α is the learning fee, *r* is the reward, or punishment, resulting from taking action in the *s* state, γ is the discount factor and the term $V_t(s_{t+1}) = \max_a Q(s_{t+1}, a)$ is the utility of the state *s* resulting from the action, obtained using the function *Q* that has been learned to date.

The *Q* function represents the discounted reward expected when taking a action when visiting the *s* state, and following an optimal policy since then. The generic *QLearning* algorithm is shown in Algorithm 1.

Algorithm 1 Pseudocode for Q-Learning

1: **for every** $s \in S$, $a \in A$ **do**
2: initializes table $Q(s,a)$
3: **end for**
4: generates an initial state
5: **repeat**
6: selects an action a and runs
7: receives reward $r = r(s,a)$
8: observe the new state s^0
9: update table $Q(s,a)$ as follows:
10: $Q(s,a) \leftarrow r + \gamma \max_a 0\ Q(s^0,a^0)$
11: $s \leftarrow s^0$
12: **until** s be terminal

Until the stopping criterion is reached which can be a maximum number of episodes, or the shortest state sequence to achieve the task objective.

5 | RESULTS

In this section, the results and simulations for the *QLearning* algorithm are presented.

5.1 Simulations

To perform the computer simulation, a space is created that corresponds to the manipulator workspace, shown in Figure 4. In this space, it is considered a starting point (SP), where the robot starts its movement to perform the trajectory, and a final point (FP), which refers to the target point, where the robot must arrive to complete the trajectory. The gray squares found in the workspace are considered obstacles, and the robot must deflect them to avoid collision.

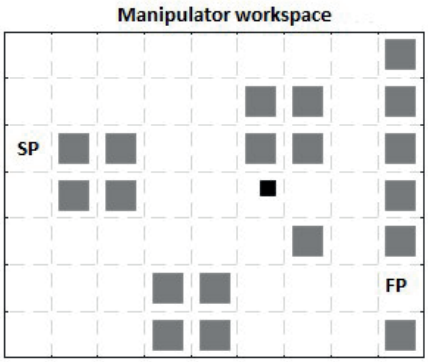


Figure 4. Workspace of the manipulator.

The actions that can be performed are shown in the tables below, and are performed at a constant speed and within a discrete time interval that is also constant. Table 1 shows the actions for the robot kinematic without constrains. Table 2 shows the possible actions for the constrained robot. The change in the direction of rotation of the joint is made so that the robot can avoid the obstacles and make the shortest path.

In Table 2, the third column represents the rotation movement of the manipulator joints, which can rotate 90°,

Action performed	Motion
A1	Forward
A2	Back
A3	To the left
A4	On the right

Table 1. Unconstrained actions.

Action performed	Motion	Rotation angle (º)
A1	Forward	0
A2	Back	0
A3	Rotation from the left	-90
A4	Rotation to the left	-90
A5	Right from the right	90
A6	Rotation back to the right	90

Table 2. Constrained actions.

considering a reference point 0 (zero) to the left or to the right.

Simulations are performed with and without constraints on the manipulator kinematics for 100 episodes and the following values are used:

- Maximum number of steps per episode = 2000
- Learning rate, $\alpha = 0.1$
- Discount factor, $y = 0.95$
- Probability of random selection, $\epsilon = 0.1$
- Eligibility trace, $\lambda = 0.5$

5.2 Results

The results of the simulations are presented by means of the figures 5 and 6 that show the learning curves during each training of the algorithm in the generation of the manipulator's trajectory.

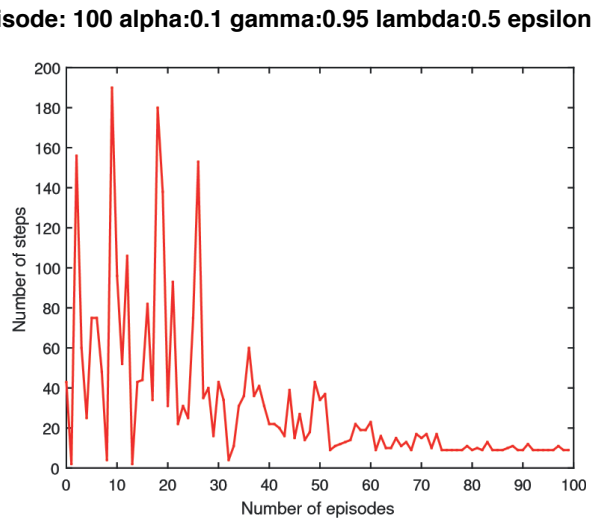


Figure 5. Algorithm without kinematic constraints.

Also extracted are the sequences of states that define the optimal policy, that is the optimum trajectory performed by the robot, which is 13 steps for the algorithm unconstrained and 8 steps for algorithm with constrains. The figures 7 and 8, below show the trajectories generated by the algorithm.

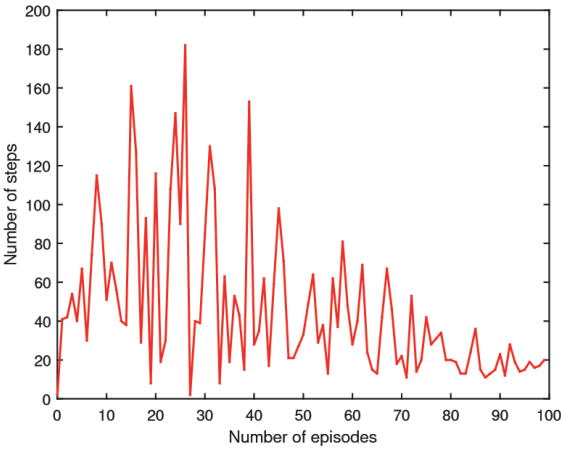


Figure 6. Algorithm with kinematic restrictions.

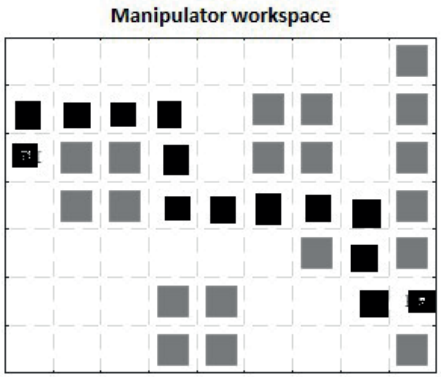


Figure 7. 13-step trajectory (algorithm without restriction).

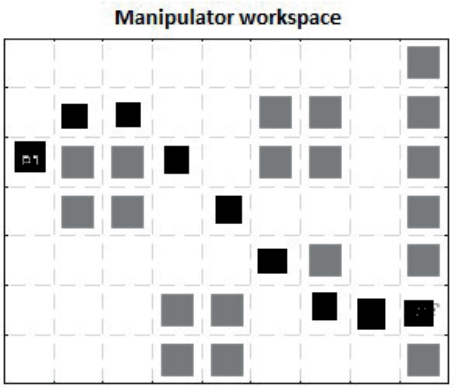


Figure 8. 8-step trajectory (restricted algorithm).

5.3 Discussions

A comparison was made between the Q-learning algorithm with and without constrains. The computational cost was verified and showed in Table 3.

Algorithm	Comp. cost [s]
Without restriction	121.780873
With restriction	169.463518

Table 3. Computational cost.

The RL Q-learning algorithm also functioned as collision-free trajectory generator of obstacles placed in the manipulator workspace. The simulations showed and compared the two forms of the algorithm used, where the algorithm with the kinematics constrained presented a better result, as shown in the previous section. The same algorithm also showed a better performance in the generation of the trajectory, that is, the trajectory had a smaller number of steps.

6 I CONCLUSION

This work presented simulations using RL in order to generate trajectories of a robot. The algorithm used was *Q-Learning*, where a comparison was made between the algorithm with and without kinematic constrains. It can be extracted, as the main conclusion of this work, that an RL can be used efficiently in the generation of trajectories of manipulators. It can also be concluded that either the algorithm shows satisfactory results and can also be used to generate collision-free trajectories.

The authors are researching other ways to improve the algorithm, such as: considering all kinematic restrictions, such as the length of links; integration the *Q-Learning* algorithm with *Robotics System Toolbox*; comparison *Q-Learning* with other collision-free trajectory generation algorithms, such as artificially obtained fields; and to perform an implementation of the *Q-Learning* algorithm in the robotic manipulator.

REFERENCES

Batista, J., Souza, D., dos Reis, L., Barbosa, A., and Araújo, R. (2020a). Dynamic model and inverse kinematic identification of a 3-dof manipulator using rlspso. *Sensors*, 20(2), 416.

Batista, J., Souza, D., Silva, J., Ramos, K., Costa, J., dos Reis, L., and Braga, A. (2020b). Trajectory planning using artificial potential fields with metaheuristics. *IEEE Latin America Transactions*, 18(05), 914–922.

Batista, J.G., da Silva, J.L., and Thé, G.A. (2018). Can artificial potentials suit for collision avoidance in factory floor?

Csiszar, A. (2016). A combinatorial approach to the automated generation of inverse kinematics equations for robot arms. In *Automation Science and Engineering (CASE), 2016 IEEE International Conference on*, 984– 989. IEEE.

Gonzalez, C. (2017). What's the difference between industrial robots? URL https://www.machinedesign.com/robotics/what-s-difference-between-industrial-robots.

Gu, S., Holly, E., Lillicrap, T., and Levine, S. (2017). Deep reinforcement learning for robotic manipulation with asynchronous off-policy updates. In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, 3389–3396. IEEE.

Hartenberg, R.S. and Denavit, J. (1964). *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill.

Jing, W., Goh, C.F., Rajaraman, M., Gao, F., Park, S., Liu, Y., and Shimada, K. (2018). A computational framework for automatic online path generation of robotic inspection tasks via coverage planning and reinforcement learning. *IEEE Access*, 6, 54854–54864.

Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1), 90–98.

Miljkovic, Z., Mitic, M., Lazarevic, M., and Babic, B. (2013). Neural network reinforcement learning for visual control of robot manipulators. *Expert Systems with Applications*, 40(5), 1721–1736.

Nair, D.S. and Supriya, P. (2018). Comparison of temporal difference learning algorithm and dijkstra's algorithm for robotic path planning. In *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 1619–1624. IEEE.

Park, J.J., Kim, J.H., and Song, J.B. (2007). Path planning for a robot manipulator based on probabilistic roadmap and reinforcement learning. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 5(6), 674–680.

Pinto, M.F., Mendonça, T.R., Olivi, L.R., Costa, E.B., and Marcato, A.L. (2014). Modified approach using variable charges to solve inherent limitations of potential fields method. In *Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on*, 1–6. IEEE.

Ribeiro, C.H.C. (2002). *Estudo de Desempenho de Algoritmos de Aprendizagem sob Condiçõ̃es de Ambiguidade Sensorial*. Ph.D. thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Romano, V.F. (2002). Robótica industrial. *São Paulo: Edgard Blucher*¨ .

Sciavicco, L., Siciliano, B., and Dawson, D. (1997). Modeling and control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(2), 315.

Shim, M.S. and Li, P. (2017). Biologically inspired reinforcement learning for mobile robot collision avoidance. In *Neural Networks (IJCNN), 2017 International Joint Conference on*, 3098–3105. IEEE.

Sutton, R.S. and Barto, A.G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*, volume 1. MIT press Cambridge.

CAPÍTULO 17

CONTROLE DE PRECISÃO PARA PRÓTESES MECÂNICAS

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 05/02/2021

Haniel Nunes Pereira Pinheiro
Faculdade de Tecnologia de São Paulo
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/3486359065204982

Ronaldo Domingues Mansano
Universidade de São Paulo
São Paulo – SP
http://lattes.cnpq.br/5052583113565041
https://orcid.org/0000-0002-9567-1813

RESUMO: No presente trabalho é demonstrado o desenvolvimento de um controle eletrônico que permite transformar uma prótese mecânica em uma prótese biônica. Este sistema envolve eletromiografia e comando de voz, ambos acionados de modo independente, o que pode facilitar a adaptação do paciente além de permitir customização por parte dele. O intuito é abranger as diversas condições de lesão que um usuário prostético pode apresentar, e em contrapartida apresentar baixo custo, tornando o sistema facilmente reprodutível e de fácil manutenção. Neste projeto não foi desenvolvido nem estudado o design mecânico da prótese. Foi utilizado um modelo gratuito da *ONG EXIII* chamado *Hackberry*, reproduzido com auxílio de uma impressora 3D. Os resultados são satisfatórios e demonstram que um controle eletrônico de 300 reais é suficientemente bom para controlar movimentos simples do dia a dia.

PALAVRAS - CHAVE: Próteses, Arduino, eletromiografia.

PRECISION CONTROL FOR PROSTHESIS

ABSTRACT: The present work shows the development of an electronic control, that is capable to transform a mechanical prosthesis into a bionic prosthesis. This system mixture electromyography and voice control techniques to activate the actuators. Both options are independently controlled. This can reduce the time to adaptation and turn the system more customizable. The patient that prefer voice commanders, can use this, disabling the EMG. Or vice-versa. The intention is cover the various conditions of lesion that a prosthetic can present, and, in counterpart, do this with low-cost and good performance. In this job we not do studies about the mechanical design of the prosthesis neither mechanical resistance tests. We use a free model designed by the japanese non-governmental organization 'exiii' called 'Hackberry', licensed in creative commons license type. The prototype was replicated with help of a 3d printer. The results are very satisfactory and show that a control of 40-50 dollars can recreate the daily life essential moves.

KEYWORDS: Electromyography, Arduino, prosthesis.

1 I INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos a tecnologia de semicondutores foi se aprimorando cada vez mais. Hoje, pequenos chips, contendo

estruturas micrométricas, são capazes de executar as mais diversas tarefas e funções. Graças a esse avanço e a produção em larga escala, é possível obter um microcontrolador por preço acessível, independentemente do local do planeta onde você esteja. Pensando nesses avanços e nas necessidades cruciais da sociedade - principalmente da brasileira - nasceu a ideia de contribuir criando um sistema de controle para tornar próteses mecânicas em próteses biônicas, de modo que seja possível executar com precisão movimentos pré-estabelecidos.

As próteses biônicas já existem e vêm ganhando mercado desde o início do século 21. Empresas como *Open Bionics, Naked Prosthesis, Arm Dynamics, Shadow Robots*, entre outras já desenvolvem avanços nessa área e possuem próteses muito precisas disponíveis comercialmente. O grande empecilho para a maioria dos amputados adquirirem um equipamento deste tipo é o elevado custo, e por esta razão, nosso foco é demonstrar como uma prótese puramente mecânica pode ser adaptada para se tornar biônica utilizando componentes de baixo custo. Para isto, foi utilizado uma placa baseada no Arduino Nano (chip ATMega328P), um módulo Bluetooth HC-06, servos motores do tipo SG-90, controlados com sistema PWM e capazes de fazer rotações em 180º, alguns resistores e potenciômetros e um módulo de acionamento eletromiográfico *Muscle Sensor V3.0* da empresa *Advancer Technologies* - um agregado de amplificadores operacionais, instrumentais, filtros passivos e ativos, capaz de amplificar o sinal muscular e detectar quando o musculo está relaxado ou contraído. O detalhamento da montagem será destacado mais a frente. É importante que o módulo de eletromiografia utilize poucos eletrodos, pois isso reduz o tempo de fisioterapia necessário para o usuário se adaptar à prótese. [LAU]

Para desenvolver o sistema, uma prótese de licença aberta e gratuita, extraída do site da ONG japonesa *EXIII*, chamada *Hackberry* (ver figura 1), foi reproduzida com o auxílio de uma impressora 3D. A qualidade mecânica da reprodução não foi feita com exatidão, mas como o objetivo é desenvolver as técnicas de acionamento e controle, a qualidade mecânica não foi considerada nesse trabalho, e portanto, mesmo com alguns defeitos o modelo foi mantido.



Figura 1 – Prótese exiii Hackberry.
Fonte: http://exiii-hackberry.com/

Para facilitar a compreensão da montagem, será explicado nas seções seguintes o funcionamento do sistema eletromiográfico e sua interação em conjunto com o sistema de controle por voz. Todos os materiais utilizados nesse projeto foram custeados com auxílio de uma bolsa do CNPQ. Agradecemos o órgão pelo incentivo.

2 | ENTENDENDO A ELETROMIOGRAFIA

A eletromiografia consiste em captar o sinal elétrico dos músculos, proveniente de junções neuromusculares. Analisando esses sinais pode-se extrair características do estado muscular, e identificar problemas no sistema nervoso ou motor. Em nosso caso, a técnica será utilizada para identificar o estado muscular com o intuito de permitir um acionamento quando o músculo é contraído.

A origem da técnica tem princípio no estudo da eletricidade no peixe elétrico em 1666, por Francesco Redi. Em 1792 Luigi Galvani descobriu que a eletricidade é capaz de provocar contrações musculares. Isso ocorreu devido ao contato de um metal carregado eletricamente com a coxa de uma rã morta. A partir deste momento, começaram os estudos da eletricidade galvânica, que, após alguns anos, foram decifradas pelo próprio Galvani, em tratar-se de reações químicas. Após um século, em 1849, Emil du Bois-Reymond, aprofundou as pesquisas no conceito da bioeletricidade e chegou a conclusão de que seria possível medir a eletricidade produzida por um músculo. Este experimento foi realizado em 1890 por Étienne Jules-Marey, que introduziu o termo eletromiografia [HUSSAIN, REAZ, MOHD-YASIN].

Com o avanço das tecnologias a partir de 1900, o estudo da capacitância e da indutância permitiu o aprimoramento dos eletrodos. Com isso, a técnica de mensuração dos sinais biocorporais se aprimorou ainda mais e a eletromiografia gradativamente migrou de interna, onde o eletrodo penetrava no músculo (também chamada de técnica invasiva), para eletromiografia de superfície (técnica não invasiva). Devido à evolução da capacidade de integração dos circuitos, graças à microeletrônica, os dispositivos SMD permitiram a criação de equipamentos de medidas bioelétricas como EMG, ECG, EEG, entre outros, em versão portátil, alimentados à bateria, pilha, ou pela própria energia térmica humana tornando a mensuração mais fácil.

Para entender o sinal da eletromiografia, será explicado parcialmente, como o corpo gera o movimento.

1- O cérebro processa a indução do movimento e através do córtex motor primário, libera acetilcolina (neurotransmissor) para uma estreita faixa de neurônios, responsáveis por mover o músculo desejado.

2- O sinal de acetilcolina chega à junção neuromuscular atravessando bulbo, medula, coluna vertebral e parte do corpo, e ao entrar em contato com as paredes da membrana celular, permite que os canais de íons Na^+ e K^+ se abram, e com isso, o potencial

de membrana é variado, conforme ilustrado pela figura 2-a). Este é transmitido pelos túbulos T até o receptor DHP.

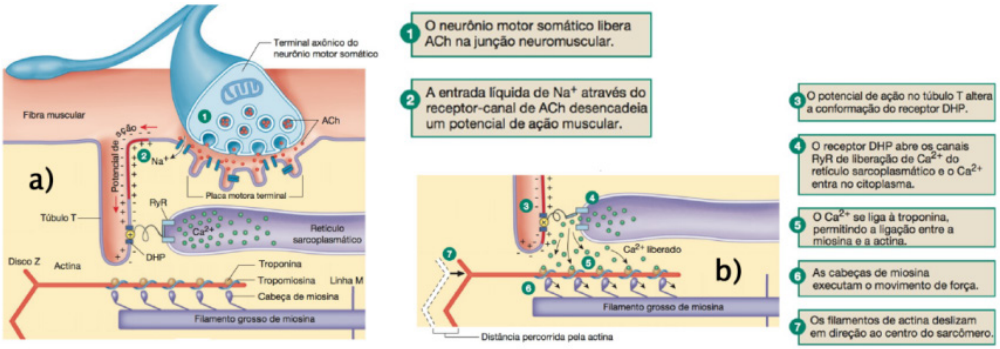


Figura 2 – Potencial de ação irradiado na junção neuromuscular.

Fonte: Adaptado da figura presente na página 418 de SILVERTHORN.

3- Ao ter sua polaridade variada o DHP sofre uma alteração em sua forma, e por ação mecânica (figura 2-b), abre o canal do sarcoplasma para que os íons Ca^{2+} entrem no citoplasma da célula muscular. Estes íons Ca^{2+} vão se unir à troponina, esta vai gerar uma contração na tropomiosina, que permitirá que a miosina se una à actina. Após esta união o filamento de miosina que estava fixo e em uma posição não natural da fibra, consegue se firmar na actina e libera um íon fosfato de creatina (Pi).

4- Após liberar o íon fosfato e a ligação com a molécula de actina estar firmada a molécula de miosina consegue realizar uma rotação, trazendo a molécula de actina para traz, como o movimento de puxar uma corda. Ao fazer este movimento ela libera a molécula de ADP contida em seu interior devido ao processo de hidrólise da ATP.

5- O filamento de actina fica preso à miosina naquela posição até que a miosina absorva outra molécula de ATP, hidrolise-a em ADP + Pi. E então, com o Cálcio proveniente dos sarcoplasma (liberados sobre ação dos neurotransmissores, ou seja, sinal cerebral do movimento), o movimento possa ser feito novamente [SILVERTHORN].

O potencial de ação produzido na membrana pela polarização gerada através dos canais iônicos, citada no passo 2, é possível de ser medido. É esse potencial que a técnica de eletromiografia mensura. Na figura 3 é demonstrado o espectro, em milivolts por milissegundos, de um potencial de ação muscular.

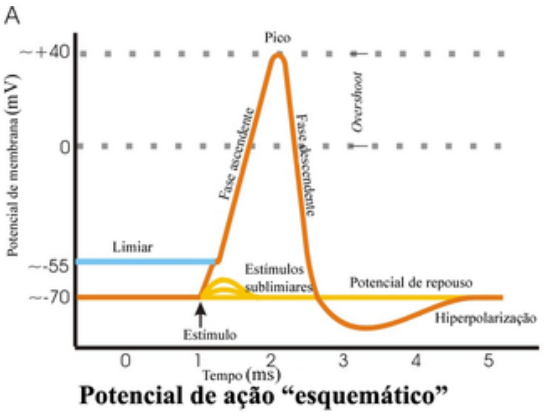


Figura 3 – Demonstração de um potencial de ação muscular.

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Potencial_de_ação

3 | O CIRCUITO ELETRÔNICO PARA A ELETROMIOGRAFIA.

Devido ao potencial de ação muscular possuir baixa voltagem, da ordem de milivolts, é difícil fazer uma medida superficial com um voltímetro ou osciloscópio diretamente, mesmo utilizando eletrodos na interface com a pele para reduzir a resistência. Desse modo, usa-se um circuito amplificador para poder melhorar a resolução do sinal e do espectro de onda, como demonstrado na figura 4. O objetivo desta seção não é explicar em detalhes o circuito utilizado no projeto, há uma postagem no portal *Instructables* [INSTRUCTABLES] criada pelo autor do módulo utilizado neste projeto, onde é explicado o passo a passo para criação de um eletromiógrafo. Mas, seguindo a analogia da figura 4, pode-se explorar muitas topologias de circuitos. [WEBSTER].

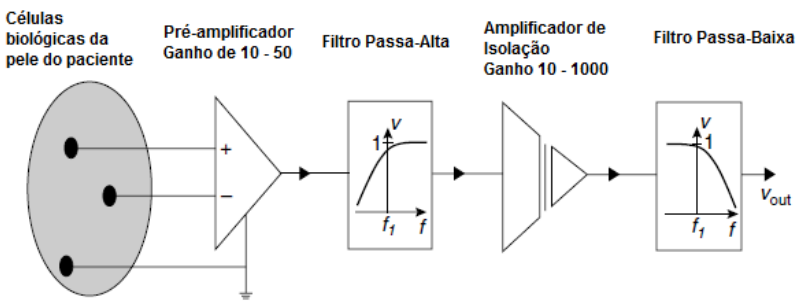


Figura 4 – Exemplo de um esquema geral para mensurar sinais elétricos do corpo.

Fonte: Adaptado de [BRONZINO].

4 | COMPONENTES E MONTAGEM.

Antes de iniciar as etapas de explicação da montagem, será descrito na tabela 1 a seguir a lista dos materiais utilizados.

Quantidade	Nome do componente
1	Arduino Nano
1	Módulo Bluetooth HC-06
1	Sensor EMG Muscle Sensor V3.0
3	Servo Motor SG-90
1	Potenciômetro 10kΩ Linear(B)
1	Potenciômetro 1kΩ Linear(B)
3	Resistores de 1kΩ
1	Fonte de tensão de 12V 1ª
1	Fonte de tensão 5V 2ª

Tabela 1 – Lista de materiais

Primeiro obteve-se a réplica da prótese citada na introdução com o auxílio de uma impressora 3D. Na figura 5 é mostrada parte da montagem. O tutorial para realizar construção da prótese é fornecido pela própria organização que a desenvolveu e explica detalhadamente como unir cada parte. Devido a falhas na impressão, a qualidade visual da prótese não ficou boa.



Figura 5 – Montagem da mão mecânica.

Fonte: Autor.

5 | CIRCUITO

Após a obtenção das partes e da montagem, iniciou-se o desenvolvimento do circuito. Decidiu-se dividir a montagem do circuito eletrônico em alguns blocos para facilitar o desenvolvimento. São eles: bloco 1, testagem e configuração dos motores; bloco 2, configuração do módulo Bluetooth e do reconhecimento de palavras; bloco 3, teste e configuração do sensor mioelétrico; bloco 4, integrar e testar o funcionamento dos 3 blocos em conjunto; bloco 5, criar os controles de posição dos movimentos e integrar o sistema à prótese.

5.1 Bloco 1

Servos motores trabalham com ciclos de modulação por largura de pulso, pwm em inglês. Tem-se dois modos de utilizá-los no Arduino. Um é aproveitar as saídas digitais identificadas como PWM e utilizá-las em conjunto com a biblioteca Servo.h. Outro é criar um loop de chaveamento das porta com o uso das funções: laço de repetição, delayMicroseconds() e digitalWrite(). Neste projeto, optou-se pela segunda opção. A folha de dados (datasheet) do servo motor específica como o PWM deve trabalhar para que o motor varie de posição. Basta configurar o sistema de modo que fique ‘m’ milissegundos em estado HIGH e ‘n’ milissegundos em estado LOW, de modo que ‘m’+’n’ defina o período de acionamento(T). Em nosso caso, T é 20ms e ‘n’ oscilou entre 1, 1,5 e 2ms para cada posição, -90º, 0º e +90º, respectivamente,

5.2 Bloco 2

Após ter conseguido definir os movimentos do servo motor, avançou-se para o desenvolvimento da comunicação via Bluetooth entre o Arduino e o celular. Para isto, utilizou-se do módulo HC-06. O Arduino por padrão tem seus pinos de comunicação RX e TX, responsáveis por fazer comunicações seriais com outros dispositivos, incluindo esse. Optou-se por utilizar o módulo em portas alternativas a estas padronizadas para o Rx / Tx, pois desse modo a comunicação USB continuaria disponível, permitindo utilizar a conexão ao computador para fazer modificações no código ou até avaliar informações do sensor EMG através do monitor da IDE [ARDUINO]. Para realizar essa adaptação de outros pinos para uma comunicação serial foi utilizada a biblioteca SoftwareSerial.h capaz de fazer essa portabilidade.

Definido os pinos da comunicação com o módulo Bluetooth, é necessário testá-los. O módulo trabalha com tensão de 3,3V, portanto deve-se atentar à voltagem de saída dos pinos de comunicação do Arduino (5V), sendo necessário criar um divisor de tensão na saída do pino escolhido como Tx (responsável pela transmissão ao módulo).

Para testar o sinal, o aplicativo BT Voice Control (Android) [SimpleLabsIn] vai ser utilizado. Com ele é possível enviar palavras para o Arduino. Associando estas à restrições(if

e else), é possível determinar quando um comando deve ser executado pela prótese.

5.3 Bloco 3

O sensor mioelétrico, muscle sensor v3.0, trabalha com alimentação positiva e negativa. O valor de alimentação simétrica indicado pelo fabricante é igual ou superior a ± 5V. Para os testes realizados neste trabalho, não foram utilizadas baterias. Uma fonte de 12V foi utilizada em conjunto com o potenciômetro de 10kΩ para criar uma simetria, gerando ±6V. Após isso, basta plugar os eletrodos na placa e o sensor já está pronto para uso.

O circuito acompanha um resistor variável do tipo SMD que controla o ganho da última etapa de amplificação, permitindo facilitar a medida no caso de sinais de baixa amplitude. O sinal de saída varia de 0 a 5V como desejado para o Arduino, e pode ser lido do terminal SIG através de uma porta analógica. O terminal GND deve ser associado ao GND do circuito. Por fim, basta utilizar o comando analogRead() para efetuar a leitura do sinal, que poderá ser monitorada via IDE (monitor serial). Ao tocar nos eletrodos o valor vai variar.

5.4 Bloco 4

Após cada parte do circuito estar projetada e testada, faz-se a conexão de ambas ao microcontrolador para um teste em conjunto. Como o módulo muscular é polarizado pelo toque dos dedos, os testes desta etapa foram feitos de modo similar ao da etapa anterior. Ao dizer 'indicador' no aplicativo, o microcontrolador ativa a porta do sinal pwm, e estabelece uma posição inicial. Após 1 segundo, ele desativa a porta para que o motor não fique sendo acionado o tempo todo. Quando o sinal do músculo for menor do que a referência (valor lógico criado com o potenciômetro de 1kΩ e a fonte de tensão de 5V – basta ligar em uma entrada analógica), o ciclo pwm muda, alterando a posição do motor. A porta é então desativada e até que haja outro acionamento o motor fica nessa posição.

5.5 Bloco 5

Por fim, após todas as etapas anteriores funcionarem corretamente, conecta-se os terminais dos servos motores, fixados na mão, ao circuito e começa-se a projetar as posições. Foram idealizados os seguintes movimentos: apenas do dedão, definido pela palavra 'dedão'; apenas do indicador, definido pela palavra 'indicador'; abrir e fechar a mão em forma de punho, definido pela palavra 'punho'; pinçar, definido pela palavra 'pinça'; ligar, definido pela palavra 'liga'; e desligar, definido pela palavra 'desliga'.

Estabeleceu-se que para trocar de posição a ser executada, deve-se dizer a palavra 'liga'. A prótese então reproduz o último movimento escolhido. Escolhe-se o novo movimento, dizendo a palavra-chave que o seleciona, como 'punho' por exemplo. A prótese reproduz o movimento, mostrando o que foi escolhido. Este sendo o correto, diz-se 'desliga' e pode-se reproduzi-lo com a contração muscular. Sendo o incorreto, diz-se outra palavra-chave, até se achar o que se quer.

Para executar os testes corretamente utilizou-se de eletrodos descartáveis de gel, pois providenciam melhor fixação. Os testes foram realizados no grupo muscular do antebraço, mas qualquer músculo que seja bem controlado pelo prostético poderá ser utilizado. O eletrodo de referência deve ser posicionado em um local que não contenha músculos, para que estes não interfiram no acionamento através de uma contração secundária e para que as cargas superficiais e a resistência da pele não sejam levadas em consideração na amplificação, podendo gerar ruído no sinal e acionamentos incorretos. A figura 6 demonstra locais para posicionamento correto dos eletrodos. O ponto sinalizado pela cor azul é um local alternativo onde os fios sinalizados pelas cores, verde e vermelho, podem ser conectados. Estes fios são os responsáveis por captarem o sinal enquanto aquele de cor amarela capta o potencial de referência.

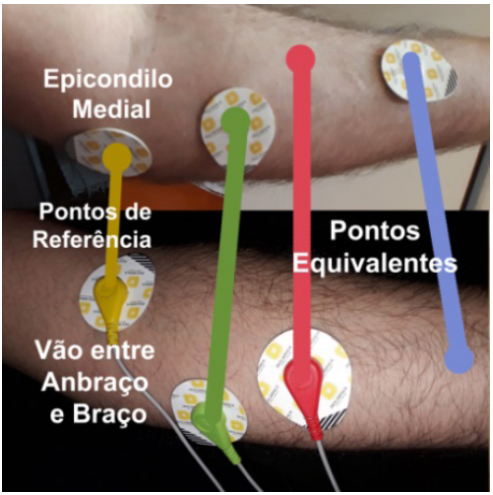


Figura 6 – Eletrodos posicionados no braço.

Fonte: Autores.

Ao posicionar os eletrodos metálicos nos auxiliares de gel, o sistema irá medir as diferenças entre os potenciais. Estes valores variam por influência de diversos fatores - quanto maior o músculo maior a quantidade de junções neuromusculares que o corpo utiliza para polariza-lo, o que muda seu potencial em relação a um menor, além disso, as condições da pele como suor, pelos, gordura e camadas de células mortas também influenciam. Para resolver esse problema de oscilação do sinal, o potenciômetro citado anteriormente foi configurado de modo que, se o valor de referência dele for menor do que o sinal enviado pela placa mioelétrica + 50 o led 13 do Arduino irá apagar e o microcontrolador irá acionar a prótese. Caso contrário, permanecerá aceso, e enquanto neste estado, o microcontrolador não aciona os motores. O valor 50 é somado à referência para evitar

acionamentos involuntários, visto que o sinal muscular oscila em algumas dezenas de unidades constantemente. Este valor deve ser ajustado experimentalmente. Na figura 7 é apresentado o desenho esquemático final do circuito.

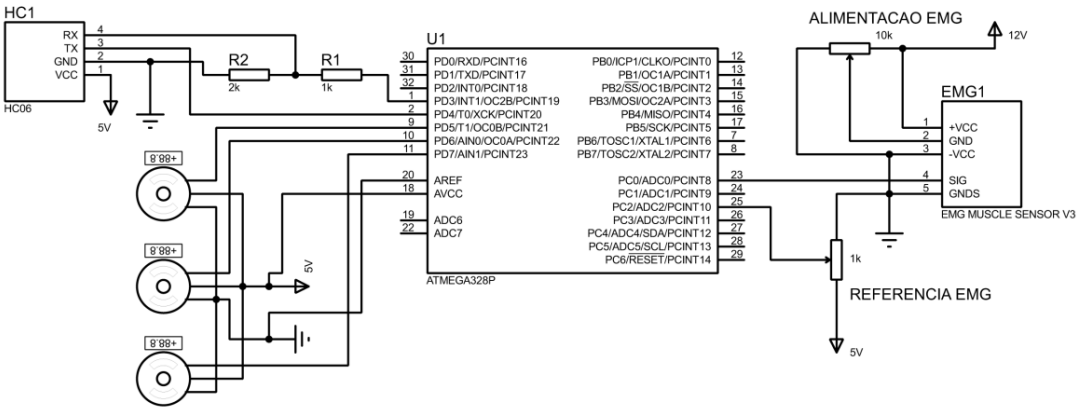


Figura 7 – Diagrama esquemático do circuito.

Fonte: Autores.

Verificou-se que cada motor estava consumindo entre 400 e 600 mA, e para acionar 3 motores seria necessário mais que 1 A de corrente. As baterias ou fontes utilizadas para acioná-los devem ser capazes de fornecer no mínimo 2A ao circuito.

6 I RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos após a etapa final de montagem são demonstrados através das figuras 8 e 9. As figuras apresentam apenas as posições mais complexas, “pinçar” e “punho”, que já demonstram o funcionamento do dedão e do indicador em sua ativação, provando que as outras duas posições, representadas pelo nome dos respectivos dedos também funcionam. Na figura 8 é demonstrado o acionamento da posição ‘pinçar’ quando o músculo é contraído.

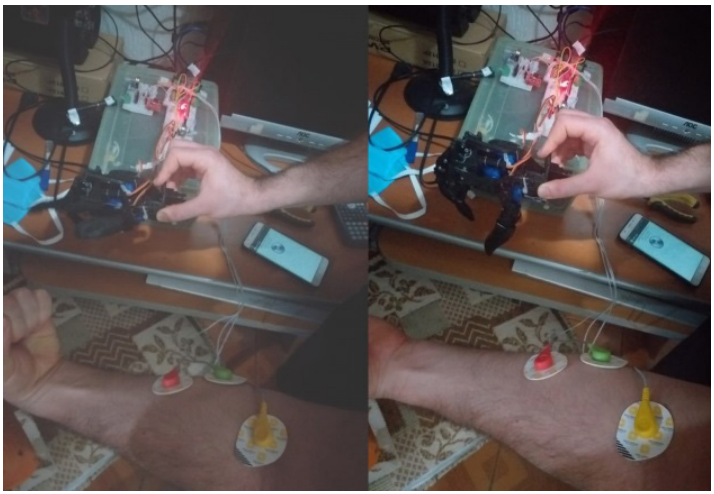


Figura 8 – Eletrodos fixados e acionamento da posição pinçar.

Fonte: Autores.

Conforme explicado no tópico anterior quando o musculo é contraído o sinal do sensor fica menor que o da referência, o led apaga e a mão executa o comando (abrir ou fechar). Na figura 9 b) o comando já foi executado, o led 13 acendeu novamente pois o musculo já relaxou. Na figura 9 a) é ilustrada a posição “punho” no estado aberto.

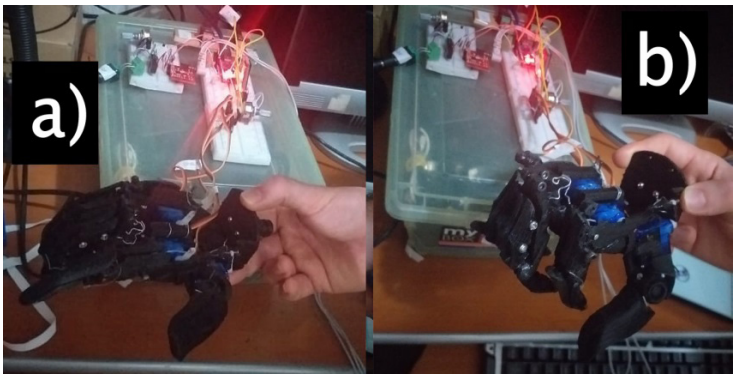


Figura 9– Posição punho quando acionada.

Fonte: Autores.

Ao se tentar carregar coisas ou segurar objetos com a prótese, dois obstáculos interferiram. O primeiro é que a má impressão da prótese danificou algumas estruturas das junções dos dedos e o movimento destes, em algumas situações, trava. O segundo, é que

os motores só apresentam 2kgf sendo necessária uma força de 4kgf ou maior para cada dedo de modo a replicar a força humana. Como o objetivo do trabalho é o desenvolvimento do controle eletrônico, não se projetou uma nova prótese, mas. esta não satisfaz as necessidades de um possível usuário.

Analisando o sistema eletrônico, percebe-se que este funcionou conforme o esperado. Possui fácil controle e atende às expectativas idealizadas. Mas, em situação ideal, como esta onde se realizou os estudos, não é possível prever as falhas e as dificuldades que o sistema terá ao ser utilizado por um prostético em seu cotidiano. Portanto, a análise feita neste trabalho é parcial e não compreende os problemas gerados pela rotina de um usuário, que incluem:

- artefatos produzidos por suor ou deslocamento e que geram acionamentos incorretos.
- desconforto no uso da prótese por muitas horas.
- defeito dos motores ou da estrutura quando submetidos a determinado stress.
- dificuldade de carregar uma carga por muito tempo.

Esses e outros fatores precisam ser estudados em um projeto mais robusto, envolvendo um paciente, para que o sistema seja aprimorado além das condições ideais de uso. Deste modo é possível desenvolver uma prótese direcionada a ele, com os tamanhos proporcionais ao seu corpo, e com toda a caracterização eletrônica em função das necessidades diárias, incluindo compartimentos hermeticamente fechados, pensando em dias chuvosos ou interação com a água, sistema de transmissão de força melhor desenvolvido, de modo a balancear o peso total da prótese com a capacidade da mesma, análise de tração e compressão de cada dedo, controle de pressão na ponta do dedo, sensação de toque, entre outros sistemas possíveis de serem desenvolvidos.

7 | CONCLUSÃO

Conclui-se com a realização deste projeto que a dificuldade e a complexidade por detrás do desenvolvimento de próteses biônicas em ambientes ideias são muito baixas, visto que os comandos respondem exatamente da forma que eles são idealizados. As dificuldades encontradas foram facilmente resolvidas, levando em conta que o sistema todo foi criado em meio a uma pandemia. A verdadeira complexidade se dá em condições reais de uso, não exploradas aqui, e, portanto, não totalmente entendidas.

O sistema atual ainda poderia ter sido aprimorado com redes neurais, mas este tipo de aprimoramento visa o controle do acionamento em meio a artefatos de movimento e de suor, que possam polarizar o eletrodo incorretamente. Como os testes deste trabalho foram realizados em regime estático, e com apenas dois eletrodos, não houve a detecção de artefatos e, portanto, não foi possível gerar este sistema. Ainda assim, mesmo que

fossem simulados propositalmente, servindo de base para a criação da rede, não haveria a garantia de que, quando usado por um usuário real, se comporte de forma correta. As características biocorporais variam de pessoa para pessoa e a dinâmica imposta ao sistema varia de tarefa para tarefa. Portanto, o uso de redes neurais para controle da atuação deve ser personalizado para cada indivíduo e tarefa, atendendo a necessidades específicas [BAETA].

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ, pela bolsa de categoria PIBITI. Graças a ela foi possível bancar os custos do projeto. Agradecemos à Universidade de São Paulo, USP, à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, FATEC-SP e a todos que colaboraram de alguma forma com o projeto.

REFERÊNCIAS

Arduino. **IDE Arduino Software**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/main/software>. Último acesso em: 25 jan. 2021.

BAETA, C. A. **Proyecto Roujin: Entorno experimental para pruebas de control con señales bioeléctricas.** 2015. 71 h. Tesis (Graduación em Ingeniería Informática) – Grupo de Informática Gráfica Avanzada, Universidade Zaragoza, Saragoça, 2015.

BRONZINO, J. D. **The Biomedical Engineering Handbook: Medical Devices and Systems**. 3ª edição. Florida: CRC Press, 2006. Cap 47, p. 904-917.

Instructables. **Muscle EMG Sensor's for a Microcontroller**. Disponível em: <www.instructables.com/id/Muscle-EMG-Sensor-for-a-Microcontroller/>. Último acesso em: 25 jan. 2021.

LAU, B. G. **An intelligent Prosthetic Hand using Hybrid Actuation and Myoelectric Control.** 2009. Cap. 3 P. 49.

SILVERTHORN, D. U. **Fisiologia Humana: uma abordagem integrada**. 5ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2010, n. 1, cap 9, p. 296-330.

SILVERTHORN, D. U. **Fisiologia Humana: uma abordagem integrada**. 5ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2010, n. 2, cap 12, p. 406-445.

SILVERTHORN, D. U. **Fisiologia Humana: uma abordagem integrada**. 5ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2010, n. 3, cap 13, p. 446-466.

SimpleLabsIN, **BT Voice Serial**. Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=robotspace.simplelabs.amr_voice&hl=pt_BR >. Último acesso em: 25 jan. 2021.

REAZ, M.B.I. HUSSAIN, M.S. MOHD-YASIN, F. **Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications.** NCBI, v. 8, 2006, p. 11-35, 23 mar. 2006.

WEBSTER, J. G. **Medical Instrumentation: Application and design**. 4ª edição. John Willey & Sons, 2010. Cap 5, p. 189-240.

CAPÍTULO 18

ESTUDO DA VIABILIDADE DO MEDIDOR DE FREQUÊNCIA RESPIRATÓRIA FLOW™ E ADAPTAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 05/02/2021

Camila de Souza Gomes
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/6772598949756659

Ana Carolina Silva de Aquino
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/3802942698025709

Gabriela Haydee Mayer de Figueiredo Barbosa
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/3476107957324590

Maria Eduarda Santos Amaro
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/2035740642569205

Sergio Murilo Castro Cravo de Oliveira
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/1360332912881863

Lilian Regina de Oliveira
Centro Universitário Newton Paiva
Belo Horizonte – Minas Gerais
http://lattes.cnpq.br/7023999884441279

RESUMO: Sinais vitais (SSVV) são sinais clínicos inerentes ao exame físico do paciente, que permitem avaliar as funções fisiológicas básicas do corpo humano. Com a evolução desses prognósticos, tanto no âmbito científico quanto no âmbito tecnológico, nota-se a necessidade de uma pesquisa contemporânea no que tange a mensuração da frequência respiratória. No atual cenário de propagação pandêmica do COVID-19, pode-se notar uma maior necessidade dessa avaliação ser ainda mais precisa. A pesquisa tem como objetivo a criação de um aparelho seguindo o modelo FLOW, que possibilite o estudo e medição dos parâmetros respiratórios de indivíduos voluntários saudáveis ou com patologias respiratórias sendo, asma, bronquite, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e pneumonia focos dos testes. Os resultados poderão ser avaliados pelo profissional de saúde através de um banco de dados, no qual o aparelho será conectado em uma rede vinculada.
PALAVRAS - CHAVE: Frequência Respiratória; Medição; Patologia; Respiração; Técnicas de diagnóstico do sistema respiratório;

FEASIBILITY STUDY OF FLOW ™ RESPIRATORY RATE METER AND ADAPTATION FOR THE IDENTIFICATION OF PATHOLOGIES

ABSTRACT: Vital signs (VS) are clinical signs inherent to the physical examination of the patient, which allow the assessment of the basic physiological functions of the human body. With the evolution of these prognoses, both in the scientific and in the technological scope, there is a need for contemporary research regarding the measurement of respiratory rate. In the current scenario of pandemic propagation of COVID-19, it can be noted that there is a greater

need for this assessment to be even more accurate. The research has the goal to create a device following the FLOW model, allowing the study and measurement of the respiratory parameters of healthy individuals or with respiratory pathologies, being asthma, bronchitis, chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and pneumonia focus of the tests. The results can be evaluated by the health professional through a database, in which the device will be connected to a network.
KEYWORDS: Breath; Diagnostic techniques of the respiratory system; Measurement; Pathology; Respiratory Frequency.

1 | INTRODUÇÃO

Os sinais vitais (SSVV) são parâmetros imprescindíveis para a realização do exame físico durante a consulta de enfermagem. São considerados como rotina a avaliação da frequência respiratória, frequência cardíaca, pressão arterial e temperatura. Os dados mencionados são avaliados, para analisar o estado de saúde do paciente, de modo não invasivo, rápido e eficiente. Permitindo avaliar o sistema fisiológico, detectando suas necessidades básicas e possibilitando uma intervenção imediata.

A mensuração da frequência respiratória é realizada para avaliar a expansão e retração do tórax e abdômen, um movimento fisiológico exonde o corpo visa receber o oxigênio, dispensar o dióxido de carbono e executar a troca gasosa entre os alvéolos, transformando o sangue venoso rico em gás carbônico em um sangue arterial rico em oxigênio.

A avaliação acontece através da inspeção, um método visual, que examina o movimento da caixa torácica, analisando a amplitude do tórax, ritmo da inspiração e expiração, simetria dos movimentos torácicos e se o examinado encontra alguma dificuldade respiratória. Deve ser avaliado durante um minuto, levando em consideração que uma respiração corresponde a uma inspiração e uma expiração.

Segundo Machado (1975), “a habilidade em observar é o resultado de um processo longo e árduo de deliberação e identificação de problemas (...)”. Pode-se então concluir, que o método de avalição pela inspeção pode ser falho caso o profissional não mensure no tempo necessário ou não consiga abordar todos os critérios que a avaliação respiratória exige.

Sabe-se que a respiração e um dos sinais vitais em que o paciente tem autonomia de autocontrole, “o paciente não deve estar ciente de que a frequência está sendo avaliada, pois ele pode alterar o padrão de respiração” (VAUGHANS, 2012, p.79).

A realização do registro de enfermagem é essencial para assistência ao paciente, devendo ser registrado toda a prática realizada durante a consulta. Teixeira (2015), evidencia em seu estudo, falhas recorrentes nas anotações dos SSVV em prontuários, mesmo estes sendo de obrigatoriedade legal da equipe de enfermagem, e se não feitos, prejudicam a troca de informação entre os profissionais. Dentre eles a frequência respiratória geralmente

é o sinal vital menos relatado em seus prontuários.

A presente pesquisa tem como objetivo a adaptação do aparelho FLOW™, confeccionado na Noruega pela empresa *SweetzPot*, é nada mais nada menos, que um sensor desenvolvido para o monitoramento respiratório de atletas. A criação do protótipo visa auxiliar os profissionais de saúde na identificação de alterações respiratórias, classificação patológica e alterações fisiológicas que o paciente possa apresentar, além de contribuir para consultas e proporcionar a obtenção de resultados fidedignos.

O aparelho produzido pela empresa norueguesa, é avaliado no valor de US$299,00. Desta forma, visando um melhor custo benefício, almeja-se realizar uma adaptação do mesmo, de modo que seja revendido a um valor mais baixo e ainda permita a realização da avaliação clínica pelos profissionais de saúde, por meio de gráficos em um *display,* através de um aplicativo.

1.1 Justificativa

Como dito anteriormente, a avaliação da frequência respiratória não deve ser dita ao paciente quanto estiver sendo executada. Uma vez que este, tem pleno controle do seu padrão respiratório quando está ciente do procedimento. De acordo com Curado (2017, p.91), o profissional pode fazer a avalição logo após a verificação do pulso, ainda com os dedos sobre o punho do paciente, como se ainda estivesse verificando seus batimentos cardíacos. Além disso também deve ser avaliada a profundidade e o ritmo dos movimentos do tórax.

Ao analisar o cenário da pandemia pelo COVID-19, nota-se uma necessidade crescente da monitorização dos parâmetros respiratórios. De acordo com dados fornecidos pela OMS (Organização Mundial de Saúde), uma em cada seis pessoas infectadas desenvolvem dificuldade de respirar. “A avaliação precisa do quadro respiratório é muito importante, pois fornece informações que possibilitam ações que, se realizadas em tempo hábil, podem salvar a vida de uma pessoa” (VAUGHANS, 2012, p.79).

Desta forma, com o avanço da tecnologia na medicina é de grande valia o desenvolvimento de um aparelho que se adapte aos diferentes usuários e facilite a monitorização da frequência respiratória feita pelo profissional, uma vez que um dispositivo poderá gerar dados precisos, evidenciar padrões respiratórios e não sobrecarregar o examinador.

2 I REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Patologias Respiratórias

A asma, é uma síndrome complexa com muitos fenótipos clínicos tanto em adultos quanto crianças. Suas características principais incluem, grau variável de obstrução de fluxo aéreo, hiper responsividade dos brônquicos e inflamação das vias aéreas (Busse *et*

al., 2001).

Em 2017, o *Global Strategy for The Diagnosis, Management*, *And Prevention of Chronic Obstructive Pulmonary Disease* evidenciou que a Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica (DPOC) é causada devido à combinação da bronquite crônica, uma inflamação das pequenas vias aéreas, e a destruição do parênquima pulmonar, chamado de enfisema. A junção de ambas as condições causa alterações estruturais, estreitamento e perda da adesão dos alvéolos as pequenas vias aéreas, comprometendo a elasticidade destas, e levando a diminuição da a capacidade de permanecerem abertas durante a expiração. O uso de tabaco é um grande fator de risco no desenvolvimento do DPOC.

De acordo com a Biblioteca Virtual em Saúde (2015), a pneumonia, é caracterizada por uma infecção nos pulmões, provocada por algum agente infeccioso ou irritante, como bactérias, fungos, vírus e reações alérgicas, onde podem acometer os alvéolos e as vezes os interstícios (espaço entre um alvéolo e outro).

Segundo Ferraz (2017), "dentre os óbitos decorrentes das doenças do aparelho respiratório, a representatividade das pneumonias era de 38% em 1996, passando para 48% em 2012".

2.2 Extensômetro ou Strain Gage

Strain Gages / Extensômetros Elétricos, são elementos resistivos analógicos (350, 700 e 1000 Ohms) fixados na estrutura de célula de carga que variam a resistência dependendo da força de compressão ou tensão que a estrutura da célula de carga recebe.

A resistência elétrica de um *Strain Gage* varia proporcionalmente com o valor da deformação do corpo de prova, como mostrado na Figura 1.

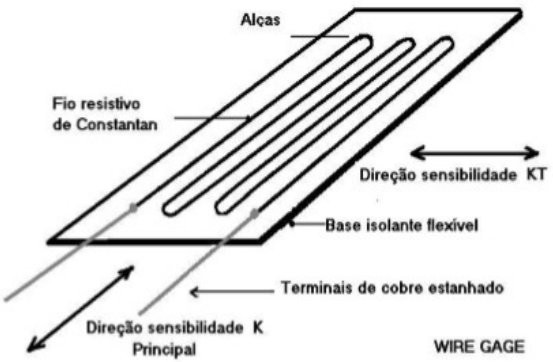


Figura 1 - Imagem representativa de um extensômetro.

Fonte: Clifford, 1973

A *Strain Gage* mais amplamente utilizado é a de componentes metálicos, nos quais são formados por um fio muito fino ou, mais comumente, por folhas metálicas dispostas em um padrão de grade. O padrão de grade maximiza a extensão dos fios ou folhas metálicas sujeitas à deformação na direção paralela. A grade é colada a um suporte fino, denominado base, que é fixado diretamente no corpo de prova. Dessa forma, a deformação sofrida pelo corpo de prova é transferida diretamente para a *Strain Gage*, que responde com uma variação linear de sua resistência elétrica.

As células de carga com tecnologia *Strain Gage* levam internamente quatro extensômetros ligados entre si conforme o conceito da Ponte de *Wheatstone.*

A saída de uma célula de carga de *Strain Gage* é expressa em termos de mV / V e é diretamente proporcional à entrada.

É através da medição do desbalanceamento da Ponte de *Wheatstone* que se obtém o valor da força aplicada.

A forma geométrica, o material do corpo da célula de carga, a intensidade da força/carga a ser medida e as condições ambientais devem ser objeto de um meticuloso estudo quanto à escolha da célula de carga.

Considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há necessidade de se "compensar" os efeitos de temperatura através da introdução, no circuito de *Wheatstone*, de resistências especiais que variem com a temperatura de forma inversa a dos extensômetros, mostrado na Figura 2 (CLIFFORD, 1973).

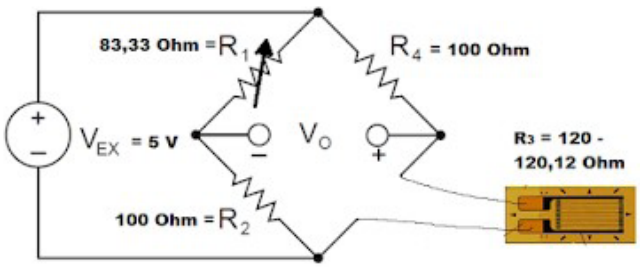


Figura 2 - Circuito em ponte de *Wheatstone*.

Fonte: Projeto Extensômero,2017

2.3 Histerese, Repetibilidade, Não-Linearidade e Fluência

De acordo com Guilherme (2016), é sabido que o fenômeno de histerese é a diferença máxima entre as leituras de saída do transdutor para a mesma força aplicada, uma leitura obtida aumentando a carga a partir do zero e a outra diminuindo a carga a

partir da escala nominal. Um efeito normalmente presente ao ciclo de pesagem que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas.

Enquanto que a repetibilidade, é a indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente.

Entretanto, a Não-Linearidade, é um desvio da média dos valores dos sinais das células de carga de uma linha reta até a força zero aplicada e a força máxima aplicada.

Por fim, a fluência (*Creep*), consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

Segundo Guilherme (2016), o fio resistivo, altera sua resistência de acordo com o "alongamento" da superfície em que está colocado, gerando dessa maneira sinais elétricos que são interpretados pela placa de aquisição, transformando os valores em deformação (*Strain*). Os valores de deformação por sua vez podem ser convertidos em tensão mecânica (ex. MPa).

Os extensômetros são colados cuidadosamente na superfície das peças que devem estar totalmente limpas diretamente em contato com o metal base (ausência de tinta, oxidação, etc). Extensômetros são usados para medir deformações em diferentes estruturas. A medida realizada colando um extensômetro nessa estrutura, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (tensão) e amplificando a para leitura em um local remoto.

2.3.2 Princípio de Funcionamento dos Extensômetros

O extensômetro é baseado no fato de que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofre uma deformação. O extensômetro uniaxial, geralmente é instalado onde as tensões no local de instalação se apresentam predominantemente em apenas uma direção, que deve ser a mesma orientação do sentido longitudinal do sensor (GUILHERME, 2016).

O formato do circuito é em ponte de Wheatstone, cujos 4 resistores são: Um de 120 Ohm (extensômetro - R_3), dois de 100 Ohm (R_2 e R_4) e um variável (potenciômetro ou trimer - R_1), com tensão de 5V da fonte.

2.4 Módulo Conversor de Sinal HX711

Baseado no sistema patenteado pela *Avia Semiconductor* tecnologia, o HX711, visto na Figura 3 é um conversor analógico-digital (ADC) de precisão de 24 *bits* projetado para

balanças e aplicações de controle industrial para interface diretamente com um sensor de ponte. O multiplexador de entrada seleciona o canal A ou diferencial de entrada B para o ruído baixo amplificador de ganho programável (PGA). O Canal A pode ser programado com um ganho de 128 ou 64, correspondente a uma entrada diferencial em grande escala tensão de ± 20mV ou ± 40mV, respectivamente, quando uma fonte de 5V está conectada à alimentação analógica V_{DD} que é o pino de alimentação. O Canal B possui um ganho fixo de 32. O regulador da fonte de alimentação *Onchip* elimina a necessidade para que um regulador de fornecimento externo forneça energia para o ADC e o sensor. O circuito *poweron-reset* do *chip* simplifica a *interface* digital inicialização. Não há programação necessária para os registros internos. Todos os controles do HX711 são através dos pinos.

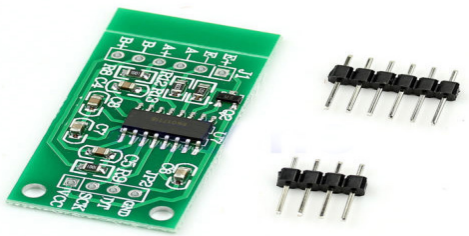


Figura 3 - Módulo conversor de sinal HX711.

Fonte: Robocore, 2019

2.5 NODEMCU ESP8266-12 V3

O NodeMcu, é uma plataforma baseada no ESP8266 para criar vários dispositivos da Internet das Coisas (IoT). O módulo pode enviar e receber informações para uma rede local ou para a Internet usando *WI-FI*.

A presença de amplificadores de potência, reguladores, sistemas de gerenciamento de energia.

As placas da geração V_1 e V_2 são fáceis de distinguir - elas têm tamanhos diferentes. Além disso, a segunda geração está equipada com uma modificação aprimorada do *chip* ESP-12 e 4 MB de memória *flash*. As placas V_3 não parecem diferentes da V_2; eles têm uma saída USB mais confiável. A empresa LoLin lança a placa V3, uma das diferenças em relação à placa anterior é que uma das duas saídas reservadas é usada para terra adicional e a segunda para fonte de alimentação USB. A placa também possui um tamanho maior que os tipos anteriores, mostrada na Figura 4 (VIDA DE SILÍCIO, 2019).

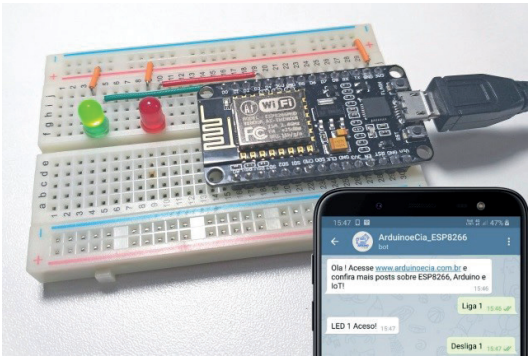


Figura 4 - NodeMCU ESP8266-12 V3.

Fonte: Elaborada pela própria autora, 2020

2.5.1 Pinagem Nodemcu

O módulo V_3 possui 11 pinos de E/ de uso geral. Pela Figura 5, é possível que se observe, algumas das características e funções adicionais: D_1-D_{10} - saídas com modulação por largura de pulso; Pinos D_1, D_2 para a interface I²C / TWI; Pinos D_5 - D_8 para a interface SPI; D_9, D_{10} - UART; A_0 - entrada do ADC.

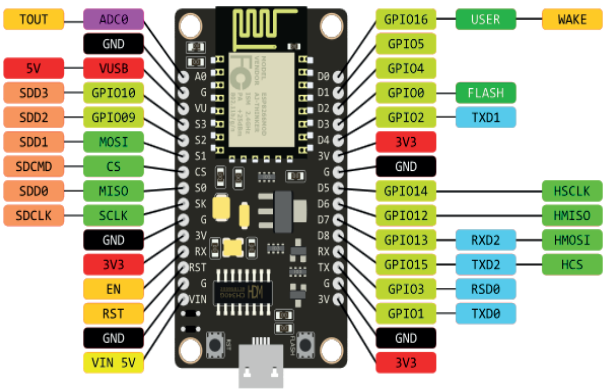


Figura 5- Pinagem de nodemcu.

Fonte: Vida de Silício, 2019

2.6 Protoboard

O *Protoboard*, é uma matriz de contato, mostrado na Figura 6, ou placa de ensaio (ou em inglês *breadboard*) é uma placa com furos de conexões condutoras para montagem de circuitos elétricos experimentais (LISBOA, [s.d.])



Figura 6 – *Protoboard.*
Fonte: Robocore, 2019

2.7 Cinta Elástica

A cinta elástica, permite que o monitor de frequência respiratória se adapte confortavelmente em volta do peito, possui regulagem de tamanho e assim atende o máximo de pessoas com diâmetros torácicos diferentes. A cinta mostrada na Figura 7, pode ser removida do monitor para lavagem sempre que necessário (WEINECK, 2000).



Figura 7 - Cinta Elástica.
Fonte: Elaborada pelos próprios autores, 2020

2.8 Aplicativo Fácil e Intuitivo

O aplicativo apresentará uma *interface* clara, objetiva e de fácil utilização. A identificação do usuário no aplicativo será através de seus dados pessoais e registro interno da instituição que normalmente é o número do prontuário (TEIXEIRA, 2016).

O *software* receberá a entrada dos dados vindo do sistema arduíno/extensômetro e mostrar como dados de saída parâmetros relacionados aos dados pessoais do usuário e a identificação do profissional responsável pela operação do equipamento. Em relação aos parâmetros fisiológicos em sua tela será apresentado, o valor da frequência respiratória e seu traçado, facilitando para o médico a identificação de uma possível patologia respiratória

em um espaço de tempo mais curto. O desenvolvimento do software é uma parte do projeto que será futuramente trabalhada.

2.9 Arduino

O Arduino Uno, é uma placa de Arduino que tem como microcontrolador principal o ATmega328P da fabricante Atmel. Possui 14 pinos digitais que podem ser utilizados como entrada e/ou saída, sendo que desses 14 pinos, 6 deles podem ser utilizados como saida PWM (Modulação por Largura de Pulso) que é um tipo de sinal elétrico para controle de motor por largura de pulso ainda tem mais 6 pinos de entrada para sinais analógicos. Para o *clock* do microcontrolador é utilizado um cristal oscilador de 16MH$_Z$, tem também conexão USB (*Universal Serial Bus*) e um conector para ligação da fonte de energia, um conector para programação e um botão de reset para reiniciar a placa.

Shields ou módulos para Arduino são placas que são desenvolvidas para serem compatíveis mecanicamente e eletricamente com as placas de Arduino, encaixando perfeitamente nas placas de Arduino e expandindo as capacidades das placas de Arduino, para diversas finalidades (SOLDAFRIA, [s.d.]).

Para melhor observação da ligação e seus respectivos locais de fixação. Segue o desenho do esquema na Figura 8 de ligação completo entre todos os itens:

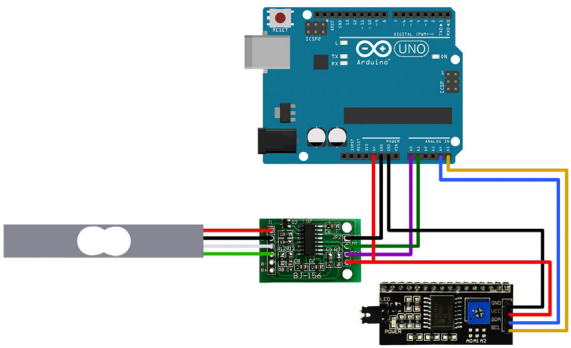


Figura 8 - Esquema de Ligação Entre Arduino, Módulo HX711 e Célula de Peso.

Fonte: Satrub,2019

O esquema de ligação dos equipamentos é bastante simples, porém deve-se ter cuidado com a conexão dos fios, que deve ser exatamente igual a imagem acima.

3 | METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi a de pesquisa exploratória, de desenho contrabalanceado, onde os sujeitos não são designados aleatoriamente para os diferentes grupos. Todos os grupos são expostos a todos os tratamentos. (SOUSA, 2007).

Além disso, adotou-se o método de abordagem hipotético-dedutivo segundo Popper, evidenciado por Marconi e Lakatos (2003, p.95). Este é então dividido em três momentos: o problema; a conjectura, onde se propõe a solução; e o falseamento. O último, sendo a etapa em que "realizam-se os testes que consistem em tentativas de falseamento, de eliminação de erros, (...) Consiste em falsear, isto é, em tornar falsas as consequências deduzidas ou deriváveis da hipótese" (MARCONI e LAKATOS, 2003 p. 97).

A pesquisa utilizou um questionário *on-line* de perguntas fechadas e abertas, como primeiro modo de coleta de dados, visando obter informação sobre a prevalência de patologias respiratórias na população brasileira. Atualmente, está sendo realizada a aplicação do mesmo questionário, em papel, em parentes da equipe de pesquisadores e em alunos voluntários do Centro Universitário Newton Paiva, afim de selecionar os participantes que participarão da fase de teste do aparelho desenvolvido, comprovando sua viabilidade.

Posteriormente, a análise dos dados coletados durante o experimento terá uma abordagem quali-quantitativa, ou seja, apresenta características qualitativas e quantitativas de acordo com Gil (2002, p.139). Este trabalho depende, desta análise de questionários aplicados aos voluntários, com foco nos pontos principais referente ao estudo, como por exemplo, a condição respiratória que apresentam.

4 | RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que ao fim do projeto tenha sido construído um protótipo de medidor de parâmetros respiratórios seguindo o modelo FLOW™, de baixo custo, que seja prático e de fácil manuseio. Seguindo o objetivo da pesquisa, este deve ser capaz de gerar medidas precisas do que está sendo avaliado, ou seja, deverá medir a frequência respiratória, assimetria torácica e converter os dados em gráficos.

Almeja-se que os dados coletados sejam enviados a uma plataforma on-line simultaneamente para serem interpretados pelo próprio profissional responsável pela avaliação. Entende-se que deste modo poderá auxiliar na identificação de patologias e/ ou alterações fisiológicas que o paciente possa vir a apresentar. Por fim, espera-se que o dispositivo se torne uma importante ferramenta na realização de diagnósticos, de monitoramento ou de estudos aprofundados referentes ao sistema respiratório. Já há padrões conhecidos a nível respiratórios para identificação de patológica por registros gráficos, como o ritmo de Biot e Kussmaul, porém não há no momento, os parâmetros métricos relacionando alongamento/ patologia. Durante a criação do protótipo, espera-se

obter dados mais assertivos e conclusivos, como mostrado na Figura 9.

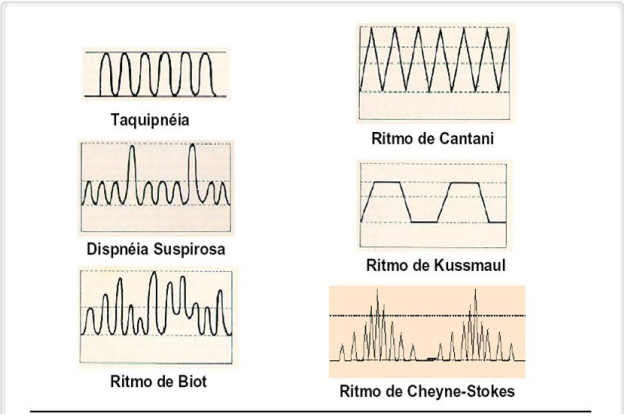


Figura 9 - Ritmos Respiratórios.

Fonte: Ribeiro, 2020

5 I CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa possui como principal proposta, elaborar um aparelho viável e de fácil manuseio que auxilie o trabalho dos examinadores ao avaliar a frequência respiratória de seus pacientes, uma vez que essa mensuração é de extrema importância.

Ao que tange o uso do aparelho, espera-se que exista um baixo número de pré-requisitos referente a idade e forma física do examinado para que o teste seja fidedigno, ou seja, espera-se que o dispositivo se adapte ao maior número de pessoas possíveis, uma vez que a população brasileira é altamente diversificada. Desta forma, um maior número de indivíduos se beneficiará do aparelho e não apenas uma pequena parcela dos usuários.

É necessário ainda, pensar no paciente. É de extrema importância que o equipamento não cause desconforto ao examinado, e sim, deve deixá-lo calmo e confortável, para que mantenha seu padrão respiratório constante e controlado evitando o risco de interferência durante a medida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Centro Universitário Newton Paiva, que financiou esta pesquisa, a toda a equipe da IronBot e do grupo de pesquisas GMAC, que colaboraram no desenvolvimento do projeto, em especial a aluna Aléxia Scharlet Rodrigues Rezende.

REFERÊNCIAS

BIBLIOTECA VIRTUAL EM SAÚDE. **Pneumonia**. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/dicas-em-saude/2137-pneumonia. Acesso em: 30 mai. 2020.

BUSSE, W.W., Lemanske, Robert F. **ASTHMA**. The New England Journal of Medicine, Inglaterra, v. 344, n.5, p. 350-362, 2001.

CLIFFORD, A.A. **Multivariate error analysis: a handbook of error propagation and calculation in many-parametersystems**. John Wiley & Sons [S.l.]. 1973.

CURADO, Ana Carolina de Castro. Fundamentos semiológicos de enfermagem. Editora e Distribuidora Educacional S.A. Londrina, 2017. Disponível em: http://www.santaisabel.com.br/upl/pagina_adicional/Download_-_FNDAMENTOS_SEMIOLOGICOS_DE_ENFERMAGEM-11-09-2019_21-34-29.pdf. Acesso em: 20 mai. 2020

FERRAZ, R. D. O; OLIVEIRA-FRIESTINO, Jane Kelly; FRANCISCO, P. M. S. B. **Tendência de mortalidade por pneumonia nas regiões brasileiras no período entre 1996 e 2012**. Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia, São Paulo, v. 43, n. 4, p. 274-279, abr.2017. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v43n4/pt_1806-3713-jbpneu-43-04-00274.pdf. Acesso em: 30 mai. 2020.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo. Atlas, 2002.

GOLD. **Global Strategy for The Diagnosis, Management, And Prevention of Chronic Obstructive Pulmonary Disease (Revised 2018)**. Washington: Global Initiative for Chronic Obstrutive Lung Disease, 2018. Disponível em: https://goldcopd.org/wp-content/uploads/2017/11/GOLD-2018-v6.0-FINAL-revised-20-Nov_WMS.pdf. Acesso em: 29 de mai. 2020.

GUILHERME, J. **Extensômetria (Strain Gauge) – O que é? Quando utilizar?** Ensus, 2016. Disponível em: https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/. Acesso em: 29 mai. 2020.

KALITUT. **Introdução ao ESP8266 Node Mucu v3**. Node MCU V3 complete guide. Disponível em: https://www.kalitut.com/2019/11/nodemcu-esp8266.html. Acesso em: 18 mai. 2020.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. D. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LISBOA, V. G. C. **Protoboard**. Protoboard – UEL, [s.d.]. Disponível em: http://www.uel.br/pessoal/ernesto/arduino/00_Protoboard.pdf. Acesso em: 18 mai. 2020.

MACHADO, M. H. , colaboradores. - **Análise da importância clínica da rotina da verificação da freqüência respiratória em pacientes hospitalizado**. Reavaliação de rotinas em Enfermagem. Rev. Bras. Enf.; 28: 23-27, 1975.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Ponte de Wheatstone**. Disponível em: https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/ponte-wheatstone.htm. Acesso em: 26 mai. 2020.

OPAS Brasil. **Folha informativa – Covid -19 (doença causada pelo novo coronavírus)**. 2020. Disponível em: https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=6101:covid19&Itemid=875. Acesso em: 26 mai. 2020

PORTAL CELULA DE CARGA. **Strain Gages**. [s.d.]. Disponível em: http://celuladecarga.com.br/17/strain-gages-extensometros-eletricos/. Acesso em: 26 mai. 2020.

SOLDAFRIA. **O que é Arduino, para que serve, como funciona, onde comprar**. [s.d.]. Disponível em: https://www.soldafria.com.br/blog/o-que-e-um-arduino-para-que-serve-como-funciona-onde-comprar. Acesso em: 25 mai. 2020.

STRAUB, M. **G.; Balança Arduino com Célula de Carga e HX711 – Tutorial Calibrando e Verificando Peso. Blog Usinainfo, 2019**. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/blog/balanca-arduino-com-celula-de-peso-e-hx711-tutorial-calibrando-e-verificando-peso/. Acesso em: 18 mai. 2020

SWEETZPOT. **Flow.** Disponível em: https://www.sweetzpot.com/flow. Acesso em: 13 mai. 2020

TEIXEIRA, Cristiane Chagas *et al.* **Aferição de sinais vitais: um indicador do cuidado seguro em idosos.** Texto contexto - enferm., Florianópolis, v. 24, n. 4, p.1071-1078, Dec. 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-07072015000401071&lng=en&nrm=iso. Acesso em 12 mai. 2020.

TEIXEIRA, R. T. de M. **Construção e uso de um aplicativo para smartphones como auxílio ao ensino de Física. 2016.** Tese (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/852/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Final%20Raoni%20Thales.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 12 mai. 2020.

VAUGHANS, B. W. **Fundamentos de Enfermagem desmistificados: um guia de aprendizado**. Tradução Denise Costa Rodrigues. Porto Alegre: AMGH, 2012.

VIDA DE SILÍCIO. 2019. Disponível em: https://portal.vidadesilicio.com.br/o-que-esp8266-nodemcu/. Acesso em: 20 mai. 2020

WEINECK, J. Futebol Total: **O Treinamento Físico no Futebol**. Phorte Editora, São Paulo, 2000. Busse, W.W

CAPÍTULO 19

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 05/02/2021

Gustavo Krause Vieira Garcia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia
Mossoró – RN
http://lattes.cnpq.br/4783715123158739

Antonio Lucas dos Santos Carlos
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia
Mossoró – RN
http://lattes.cnpq.br/7667681158880652

Neemias Dantas Fernandes
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia
Mossoró – RN
http://lattes.cnpq.br/4222638600619940

Taciano Amaral Sorrentino
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística
Mossoró – RN
http://lattes.cnpq.br/4229849194119201

RESUMO: O consumo de água contaminada ainda é causa de adoecimento e mortes em muitas partes do mundo. A pasteurização solar de água é uma alternativa sustentável e barata para descontaminação microbiológica de água para consumo humano. Neste artigo, propõe-se um pasteurizador solar com concentrador cilíndrico-parabólico e controle automático de vazão. Apresentam-se resultados da otimização da geometria do concentrador para as condições de irradiação normal direta de Mossoró-RN. Apresentam-se pseudocódigos para o controle do seguidor solar e para o controle automático de vazão usando válvulas solenoides. O esquema de controle de vazão segue a sugestão de Carielo *et al*. (2017) para garantia de tempos e temperaturas de pasteurização. Do modelo otimizado do concentrador, calcula-se a produção teórica diária de água pasteurizada no dia de maior irradiação direta normal para cada mês do ano de 2018, chegando a um máximo de 90 l/dia no mês de agosto.

PALAVRAS - CHAVE: Concentrador Cilíndrico-parabólico, Pasteurização Solar, Pasteurização de Água.

GEOMETRIC OPTIMIZATION AND AUTOMATION FOR A PASTEURIZER WITH CYLINDRIC-PARABOLIC CONCENTRATOR

ABSTRACT: Consumption of contaminated water is still a cause of illness and death in many parts of the world. Solar water pasteurization is a sustainable and inexpensive alternative for microbiological decontamination of drinking water. In this paper, we propose a solar pasteurizer with parabolic trough concentrator and automatic flow control. We present results of concentrator geometry optimization for normal direct irradiation conditions of Mossoró-RN. We present pseudocodes for solar tracker control and automatic flow control using solenoid valves. The

flow control scheme follows the suggestion of Carielo *et al.* (2017) to guarantee pasteurization times and temperatures. From the optimized concentrator model, we calculate the daily theoretical production of pasteurized water on the day of highest normal direct irradiation for each month of 2018, achieving a maximum of 90 l/day in August.
KEYWORDS: Parabolic trough concentrator, Solar pasteurization, Water pasteurization.

1 | INTRODUÇÃO

Água segura para beber é um recurso indispensável para comunidades humanas. No entanto, a Organização Mundial de Saúde e a UNICEF estimam que, em 2015, 844 milhões de pessoas não tinham acesso, ou tinham que se deslocar por mais de 30 minutos para ter acesso, a água para beber. Globalmente, pelo menos 2 bilhões de pessoas usam uma fonte de água para beber contaminada por fezes. Cerca de 361 mil crianças abaixo de cinco anos morrem anualmente por diarreia e o consumo de água contaminada também está relacionado à transmissão de doenças como cólera, hepatite A e tifo, entre outras (WHO e UNICEF, 2017). No Brasil, em 2011, 396 mil pessoas foram internadas por diarreia, sendo 138 mil crianças menores de 5 anos (DATASUS, 2012). É importante, portanto, desenvolver soluções para descontaminação microbiológica de água para consumo humano, sobretudo com possibilidades de uso em comunidades rurais distantes dos centros urbanos e com acesso limitado a rede elétrica.

Apesar da informação muito difundida de que a água deve ser fervida antes de beber, os microrganismos nocivos ao ser humano podem ser inativados a temperaturas mais baixas que a de ebulição da água se a água for mantida por tempo suficiente a essas temperaturas, processo chamado de pasteurização (Feachem *et al*., 1983). O tempo necessário para a inativação depende do microrganismo, mas tipicamente esse tempo diminui exponencialmente com a temperatura. O uso de radiação solar para tratar água para consumo humano é investigado sistematicamente desde os anos 1980 (Ciochetti e Metcalf, 1984), e muitas abordagens foram propostas. Quanto ao mecanismo de inativação dos patógenos, a água pode ficar exposta à luz solar, aproveitando-se assim a sinergia entre o efeito letal sobre microrganismos da radiação de maior frequência presente no espectro solar (UV e violeta) e o efeito térmico (Tyrrel, 1976), método que ficou conhecido como SODIS (*solar disinfection*), como por exemplo, em (Ciochetti e Metcalf, 1983; Borde *et al*., 2016), ou a água é mantida num recipiente opaco, geralmente pintado de preto, e o mecanismo de inativação é só o térmico, método conhecido como SOPAS (*solar pasteurization*). Sistemas de pasteurização solar com diferentes tipos de coletor já foram reportados, como coletores planos (Carielo *et al*., 2016), concentradores cilíndrico-parabólicos (Bigoni *et al*., 2014; Sakhrieh *et al*., 2016), concentradores tipo Fresnel (Domingos *et al*., 2019), concentradores parabólicos compostos (Navntoft *et al*., 2008), etc., com diferentes áreas de coleta. Diferentes tipos de controle de vazão, que permitem o armazenamento da água já tratada para uso posterior e a admissão de nova carga de

água contaminada no recipiente de pasteurização, também já foram usados: diferença de densidade entre porções de água a diferentes temperaturas (Duff e Hodgson, 2005); válvulas termostáticas, que abrem quando determinada temperatura é atingida e fecham quando temperatura cai (Bigoni *et al*., 2013); e válvulas solenoides (El Ghetany e Dayem, 2010).

Recentemente, Carielo *et al.* (2017) observaram que o uso de sistemas de vazão baseados em diferenças de densidade e válvulas termostáticas não garante um bom controle do tempo de pasteurização, e da temperatura à qual a água foi mantida durante esse tempo. Outra desvantagem que apontam no uso de válvulas termostáticas é que só é possível acionar o escoamento da água pasteurizada a uma única temperatura. Propuseram então um sistema microcontrolado que usa válvulas solenoides e estabelece vários *set points* de temperatura, cada um com um tempo de pasteurização pré-programado. A cada vez que a temperatura chega a um dos *set points* um contador é acionado. Se a temperatura ficar abaixo da temperatura do último *set point* atingido, o respectivo contador é pausado, e só volta a ser incrementado novamente após a temperatura voltar a ser igual ou superior a desse *set point*. Se a água permanecer a uma temperatura maior ou igual a do *set point* pelo respectivo tempo pré-programado, a válvula de saída libera a água pasteurizada e a de entrada admite uma nova carga de água contaminada. Nessas condições de garantia estrita de tempo e temperatura de pasteurização, usando um coletor plano com capacidade para 2 l de água e abertura de 2 m^2 o sistema chegou a uma produção diária máxima de 80 litros de água pasteurizada (Carielo *et al*., 2017).

Nesse artigo, considera-se a aplicação do esquema de controle proposto por Carielo *et al*. (2017) a um pasteurizador solar baseado em outro tipo de coletor, um concentrador cilíndrico-parabólico, com eficiência otimizada para as condições de irradiação normal direta de Mossoró-RN, e estima-se a produção diária máxima de água pasteurizada para essas condições. Primeiro, são apresentadas características do concentrador e o modelo usado para a otimização. A seguir, apresenta-se um pseudocódigo e considerações sobre o controle de vazão, e pseudocódigos e considerações sobre o seguidor solar, indispensável para esse tipo de concentrador. Finalmente, são apresentados os resultados da otimização e das estimativas de produção diária e são discutidos esses resultados.

2 | CARACTERÍSTICAS E MODELAGEM DO CONCENTRADOR

Para o desenvolvimento do modelo matemático que descreve o perfil da calha e posteriormente realizar sua modelagem, foram analisadas as variáveis nos aspectos ambiental ou climático e construtivo, avaliando a influência de todos esses parâmetros no intuito de gerar uma geometria que forneça maior eficiência ao sistema, aumentando a quantidade de água tratada.

2.1 Parâmetros geométricos

Dentre todas as superfícies cônicas, as parábolas se destacam quanto às suas propriedades geométricas, sendo a mais peculiar delas a convergência de qualquer reta que toque sua superfície interna diretamente em um ponto – no caso de uma superfície plana – ou em uma linha – perfis cilíndrico-parabólicos – respectivamente conhecidos como foco e linha focal. A equação 1 define esse tipo de geometria no plano.

$$y = \frac{1}{4f}x^2 \tag{1}$$

Em se tratando superfícies refletoras com esse perfil, existem diversos parâmetros a considerar ao projetar para que se atenda as condições de serviço, destacando-se o comprimento da calha (l), sua largura ou abertura (a), distância focal (f) e o ângulo de borda (Ψ).

O comprimento e a abertura da calha são fatores que determinam a área de abertura. Tais variáveis estão diretamente ligadas a quantidade de energia captada e devem ser dimensionadas ponderando custos com materiais e a massa da estrutura. Além disso, a escolha deve estar diretamente ligada ao fator de concentração geométrica (*CG*), ilustrado na Fig. 1, definido como a razão entre a área de abertura (*Aap,c*) e a área de recepção (*Aap,r*), que é a área da superfície externa do tubo coletor.

$$CG = \frac{A_{ap,c}}{A_{ap,r}} \tag{2}$$

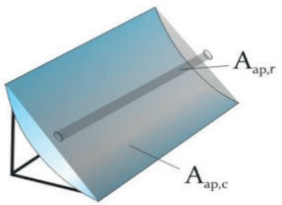


Figura 1 - Representação das áreas de abertura (*Aap,c*) e recepção (*Aap,r*) (Günther *et al.*, 2016).

No que tange à distância focal, sua influência está ligada ao grau de concavidade que terá a seção da cônica, como mostrado na Fig. 2. À medida que aumenta, a parábola se aproxima de uma reta, enquanto que a distância entre o tubo receptor e a calha aumentará, incrementando perdas térmicas no processo de concentração devido a remoção de calor

por convecção do ar nas vizinhanças. No entanto, se a distância focal for muito pequena, também haverá perda de eficiência, já que feixes incidentes nas bordas da calha percorrem trajetos maiores e, consequentemente, se espalham mais até chegar ao tubo coletor.

Em se tratando do ângulo de borda, sua influência no projeto se mostra inversa às considerações feitas para o foco. Mantendo a abertura constante, variando distância focal e ângulo de borda, como mostrado na Fig. 2, é facilmente observado o comportamento proposto para tais parâmetros.

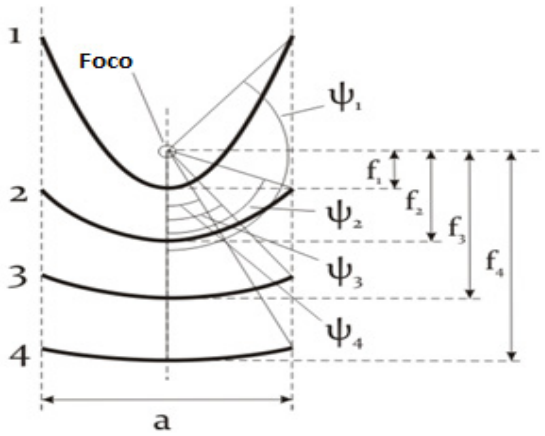


Figura 2 - Formato de seção parabólica variando foco e ângulo de borda (Günther *et al.*, 2016).

2.2 Material reflexivo

Para o material reflexivo, devem ser analisadas a resistência às intempéries como o vento e a umidade, a capacidade de refletir luz solar e seu custo. Nesse sentido, são filtrados dois materiais que atendem às exigências, os filmes de alumínio e os filmes de espelho baseados em prata. Apesar do primeiro material apresentar refletividade menor que a prata nos comprimentos de onda mais energéticos da radiação solar segundo Jagoo (2013), é facilmente moldável a superfícies com geometria complexa e custa bem menos que os filmes de prata. Portanto, é cabível a escolha dos filmes de alumínio.

2.3 Tubo coletor

O tubo coletor deve ser confeccionado a partir de um material que assegure boa transferência térmica sem grandes perdas por irradiação ou convecção e que ainda assim seja economicamente viável. No entanto, materiais que agregam todas as características físicas desejadas são dispendiosos, o que leva, na maioria das aplicações, ao uso de tubos com alta absorbância e baixa emissividade envoltos em um invólucro de vidro ou acrílico, materiais que apresentam boa transmissibilidade e baixa refletividade de acordo com

Penafiel (2011). Apesar desse artifício acrescentar perdas óticas ao sistema, potencializa o ganho térmico ao limitar transferência térmica por irradiação e condução. Nesse sentido, utilizou-se uma liga de alumínio (6065-T6) para o tubo absorvedor e acrílico para o invólucro.

2.4 Eficiência dos concentradores

Existem vários modelos teóricos que avaliam a eficiência (n) de um coletor solar, mas nenhum deles abrange de forma integral todas as variáveis incluídas na análise devido ao grau de complexidade que envolve correlacioná-las. De forma geral, as equações que quantificam tal grandeza se baseiam na fração da potência que incide no plano de abertura do coletor ($\dot{Q}$) pela que chega ao tubo do concentrador ($\dot{q}$).

$$\eta = \frac{\dot{q}}{\dot{Q}} \tag{3}$$

Admitindo que haja um sistema de rastreamento suficientemente calibrado que minimize as perdas por grandes ângulo de incidência, é possível estimar a quantidade de calor que adentra o sistema através de uma relação simples entre a irradiação direta incidente (G) em certo intervalo de tempo e a área de abertura da calha (A).

$$Q = \left(\int_{t_1}^{t_2} G\, dt\right) \cdot A \tag{4}$$

Ao contrário da energia fornecida, a potência útil é sensível à diversos parâmetros físicos. Dentre os mais relevantes estão: a reflectância do material da calha (ρ), a transmitância do invólucro do coletor (τ), a absorbância do coletor (α), o coeficiente de transferência térmica por convecção entre o ar e o invólucro (h), do fator concentração geométrica da calha (CG), da diferença de temperatura entre o fluido aquecido (T_c) e o ambiente (T_a) e da emissividade do coletor (ε). Uma das equações que relaciona de forma mais concreta todas essas variáveis baseia-se na norma ASHRAE 93-2010 que elenca metodologias para ensaios de eficiência em concentradores solares.

$$\dot{q} = G\tau\rho\alpha - \frac{h(T_c - T_a)}{CG} - \varepsilon\sigma T_c^4 \tag{5}$$

2.5 Modelo para otimização

Com base na equação para eficiência apresentada, é possível montar um modelo um tanto quanto abrangente para determinar quais as dimensões de calha fornecem a melhor resposta quando submetidas a certa condição solar. Definidas grandezas óticas e térmicas

que dependem da escolha dos materiais e das condições ambientais do local da instalação, resta estipular uma faixa de temperatura sob a qual os principais microorganismos presentes na água se degradem. Assim, é possível variar o fator de concentração geométrica da calha e definir qual é a melhor calha associada ao seu tubo coletor para tais condições de contorno. Nesse sentido, se torna conveniente correlacionar com o o máximo de parâmetros da seção parabólica para analisar sua influência no processo de otimização. Isso pode ser feito expressando a abertura do concetrador em função de tais variáveis. Usando geometria analítica simples, é possível estabelecer tais equações. A abertura da parábola como função do ângulo de borda, é dada pela equação (6) (Günther *et al.*, 2016):

$$a = f\left(-\frac{4}{tg(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{tg^2(\psi)} + 16}\right) \tag{6}$$

Logo, a área de abertura é o produto entre o comprimento da calha (l) e a sua abertura (a):

$$A = l \cdot f \cdot \left(-\frac{4}{tg(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{tg^2(\psi)} + 16}\right) \tag{7}$$

Sendo assim, o fator de concentração geométrica pode ser obtido usando (7) em (2):

$$CG = \left(\frac{f \cdot \left(-\frac{4}{tg(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{tg^2(\psi)} + 16}\right)}{\pi \cdot d}\right) \tag{8}$$

Aplicando essas equações ao modelo em função do intervalo de tempo analisado (Δt), tem-se:

$$\eta = \frac{\left(\int_{t_1}^{t_2} G\, dt\right)\tau\rho\alpha - \frac{h\Delta t(T_c - T_a)}{CG} - \varepsilon\Delta t\sigma T_c^4}{\left(\int_{t_1}^{t_2} G\, dt\right)} \tag{9}$$

3 | CONTROLE DE VAZÃO E PASTEURIZAÇÃO

O processo de inativação térmica de um patógeno possui um tempo mínimo de exposição determinado pela temperatura na qual o tratamento ocorre. O conjunto de valores de tempos de exposição e temperaturas para os quais o número de indivíduos de determinado patógeno sofre uma redução minimamente satisfatória para se determinar a pasteurização é chamada de curva de inativação. Uma das formas de garantir a pasteurização é estabelecer pontos de tempo e temperatura que se encontrem acima das curvas de inativação dos patógenos que se deseja eliminar. Os microrganismos Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa e coliformes, mostram inativação total para os pontos 3600 s à 55°C; 2700 s à 60°C; 1800 s à 65°C; 900 s à 75°C e 15 s à 85°C (Carielo *et al*., 2017).

Tendo em vista os requisitos exigidos, o sistema de controle de vazão tem como função separar uma porção da água em tratamento em um recipiente por um tempo até que um dos pontos pré-estabelecidos seja atingido.

Para manter este controle devem ser utilizados sensores termopar a prova d'água para a medição contínua da temperatura e válvulas solenoides para o controle do fluxo de água, ambos acionados por um microcontrolador Arduino, o qual segue a rotina mostrada na Figura 3. Após preenchido o recipiente coletor de energia solar, é iniciada a leitura de temperaturas. Cada uma das temperaturas de inativação supracitadas, tem um contador atrelado a ela. Enquanto a temperatura medida for superior à do ponto de inativação o contador permanece tendo seu valor incrementado. Ao atingir o tempo de inativação necessário a válvula de escoamento é aberta por tempo suficiente para esvaziar o tubo coletor, e depois essa válvula se fecha e a de alimentação é aberta, dando início a um novo ciclo.

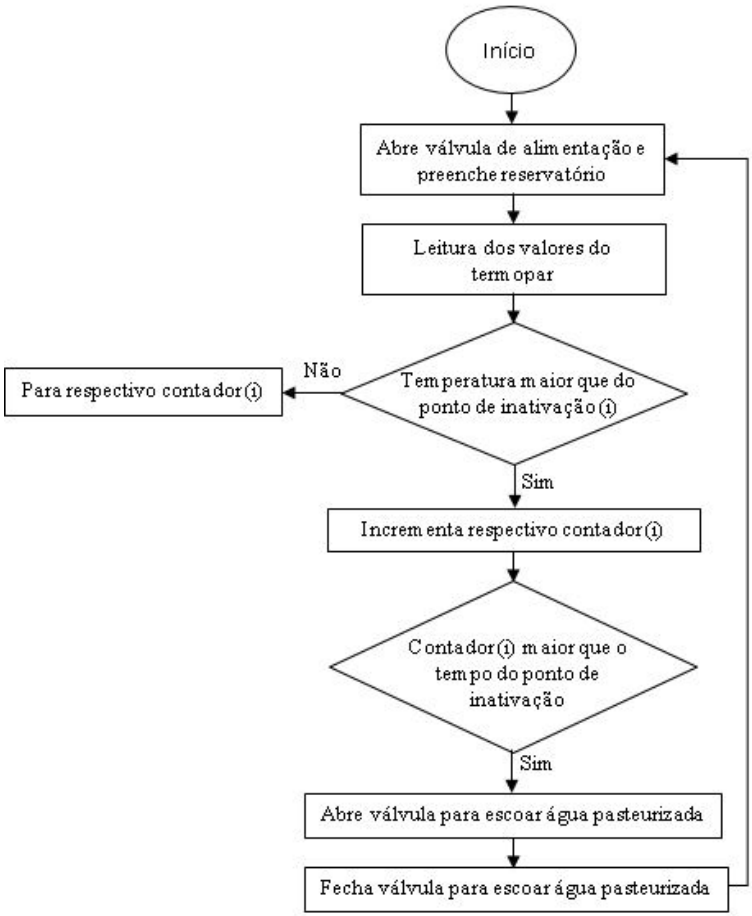


Figura 3 – Pseudocódigo para controle de vazão.

4 I SEGUIDOR SOLAR E ALIMENTAÇÃO

4.1 Seguidor solar

O sistema de rastreio solar desenvolvido consiste em três partes: o dispositivo de movimentação dos eixos, os sensores e a unidade de controle.

Dispositivo de movimentação dos eixos. Para um sistema de movimentação de dois eixos, a configuração consiste em dois motores de passo, um para cada eixo. Sendo assim, um motor fica na posição horizontal e outro na posição vertical. A Figura 4-a ilustra o sistema de posicionamento dos motores.

Sensores. O LDR (*Light Dependent Resistor* ou Resistor Dependente de Luz), é um dispositivo eletrônico passivo capaz de variar sua resistência elétrica conforme a intensidade de luz que incide sobre ele. Para conseguir medir a variação de luz obtida a

partir do LDR, podemos utilizar da propriedade do divisor de tensão e medir a variação da queda de tensão no elemento (McRoberts, 2011). Dessa maneira, um terminal do LDR é conectado a alimentação, o outro terminal é conectado à porta de leitura analógica, onde, no mesmo ponto é conectado um resistor para ser formado o divisor de tensão. Para o seguidor solar de dois eixos, adota-se um sistema com quatro LDRs divididos por um material opaco em quatro setores, conforme mostra a Figura 5-a. Um seguidor solar de um eixo (e um motor, como na Fig. 4-b), mais simples e econômico, que usa apenas dois sensores, é ilustrado na Figura 5-b.

Quando o sistema não está mais alinhado com o Sol, um ou mais dos LDRs estarão sombreados mandando a informação para unidade de controle corrigir o alinhamento.

Unidade de controle. O Arduino é uma plataforma de hardware e software aberto que possibilita praticamente que qualquer pessoa consiga realizar um projeto com eletrônica (McRoberts, 2011). Devido a sua alta difusão entre a comunidade e grande documentação, realizar um projeto com Arduino se torna mais prático e rápido, embora que ao necessitar de algo mais escalável industrialmente é recomendado adotar outras plataformas. O Arduino Uno possui seis portas analógicas, quatorze portas digitais, sendo seis delas PWM, conexões GND e de 5 V, além de outras entradas e acessórios que podem ser incorporados para aumentar sua abrangência. Toda programação é feita em uma linguagem própria baseada em C++, onde cada elemento eletrônico possui uma biblioteca para facilitar o desenvolvimento do código.

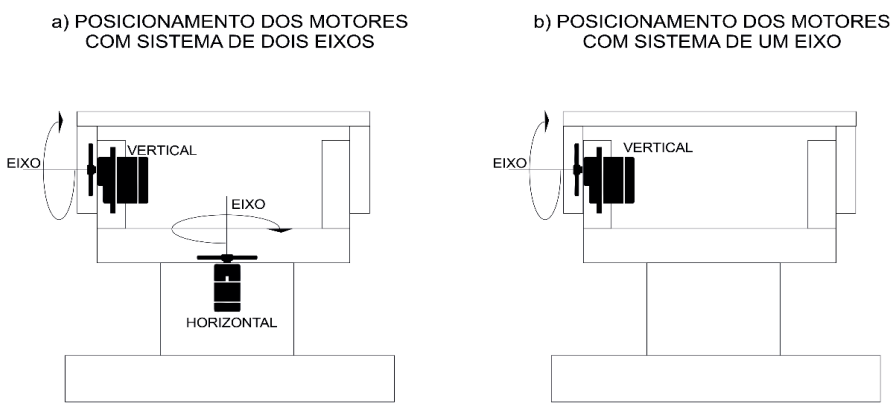


Figura 4 - Posicionamento dos motores.

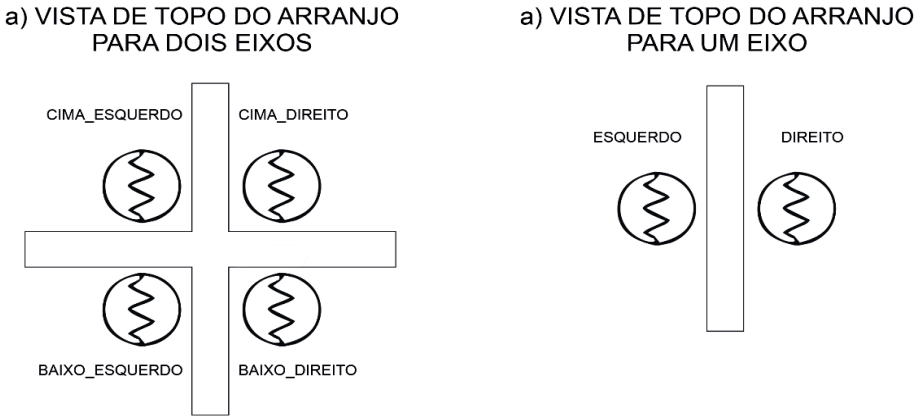


Figura 5 - Vista de topo do arranjo de LDRs.

Seguidor solar com um eixo. A utilização de dois eixos para o seguidor solar traz um custo de dois motores e um arranjo de sensores mais complexo, e, na maioria das vezes, o ganho obtido em seguir o sol através dos dois eixos não compensa o maior gasto. Um sistema mais simples e mais barato de rastreio solar, com apenas um grau de liberdade, reduzindo o número de motores para um (Figura 4-b) e o arranjo de LDRs (Figura 5-b), pode ser usado.

Algoritmo. O algoritmo necessário para o funcionamento está representado em pseudocódigo na Figura 6.

4.2 Alimentação

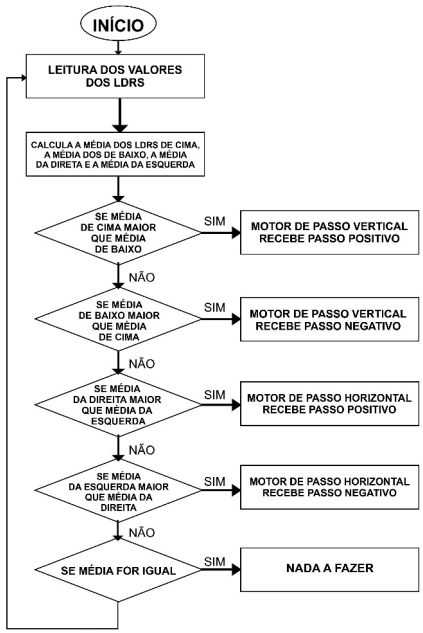
Para um sistema que utiliza o sol como fonte de energia, optou-se por abastecê-lo através de placas fotovoltaicas, que entregariam a energia necessária para a alimentação do motor, sistema de válvulas e sistema de controle. Para dimensionar um sistema de abastecimento isolado corretamente é necessário traçar uma curva de demanda, onde essa, consiste no comportamento do consumo de energia pelo sistema utilizado. Para traçar essa curva de demanda foram consideradas as potências fornecidas pelo fabricante de cada equipamento e testes individuais de demanda podem ser realizados.

Assim, utilizando os dados de potência do motor e quantas horas ele estaria em uso, com a potência das válvulas e o tempo de uso e a demanda da unidade de controle e o tempo de uso, foi possível traçar o consumo previsto para o sistema durante o dia, isso aliado ao número de bateladas realizadas pelo sistema (CRESESB, 2014).

Dessa forma foi obtida a energia total demandada pelo pasteurizador. Com a utilização do software Radiasol 2 para conseguir os dados de insolação na região, foi possível determinar a potência do módulo fotovoltaico capaz de suprir a demanda de

energia consumida pelo sistema durante o dia.

a) PSEUDOCÓDIGO PARA SISTEMA COM DOIS EIXOS



b) PSEUDOCÓDIGO PARA SISTEMA COM UM EIXO

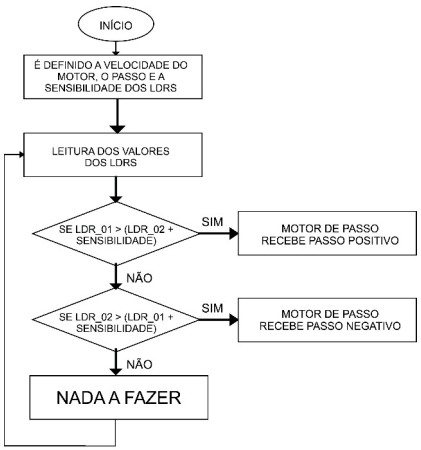


Figura 6 – Pseudocódigos para os seguidores solares.

5 I SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Definido o modelo, é preciso estabelecer as condições sob as quais será utilizado e a faixa de valores para as variáveis envolvidas, buscando o projeto mais compacto e eficiente possível. Na Tab.1 elencam-se esses parâmetros. Todas as constantes foram estabelecidas de acordo com as literaturas que trazem-nas para cada material ou condições propostas.

Variável	Intervalo ou valor	Material/condição
Transmitância do invólucro (τ)	0,92	Acrílico
Refletância da calha (ρ)	0,95	Filme de alumínio
Absorbância do coletor (α)	0,97	Alumínio
Emissividade do coletor (ε)	0,90	Alumínio (pintado de preto)
Coeficiente de convecção (h)	10 $W/(m^2K)$	30 ℃ de diferença coletor e invólucro

Ângulo de borda (ψ)	$45° \leq \psi \leq 90°$	-
Diâmetro do coletor (d)	$12{,}5\ mm \leq d \leq 25{,}4\ mm$	-
Comprimento focal (f)	$0{,}2\ m \leq f \leq 1{,}5\ m$	-
Temperatura do ambiente (T_a)	$30℃ \leq T_a \leq 40℃$	-
Temperatura do coletor (T_c)	$70℃ \leq T_c \leq 100℃$	-

Tabela 1- Condições de contorno para a otimização.

Em se tratando da irradiação direta, obtiveram-se os dados para a cidade de Mossoró através do software Radiasol para o mês com maior irradiação diária de 2019, no caso outubro. A Fig. 5 apresenta tais dados.

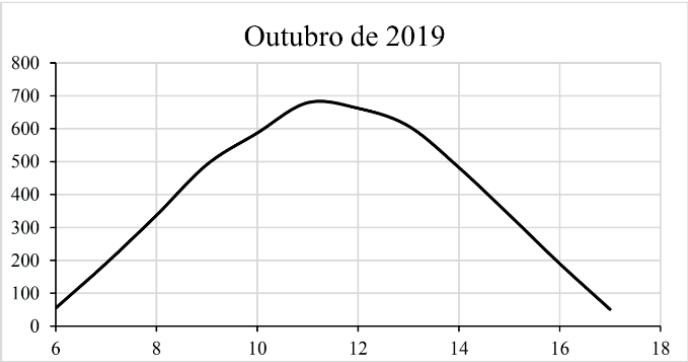


Figura 7 - Irradiação solar média por hora no dia de maior insolação de outubro.

Para a otimização, serão utilizados os dados do mês com maior irradiação média, ou seja, outubro. Pelo gráfico, observa-se que o pico de DNI ocorre entre às 10 h e 12 h. Portanto, a energia total disponível neste intervalo corresponde área sob a curva. Integrando a curva no intervalo estabelecido, obtém-se a irradiação total no período.

$$G \cong 4709\ kJ/m^2$$

Em posse dos dados, utilizou-se a ferramenta para solução de problemas de otimização do software *MatLab*, mais precisamente, a rotina *fmincon*, baseada em uma lógica que usa o método dos pontos interiores. Além das condições propostas, foi atribuída

às entradas da rotina uma restrição para garantir que a abertura da calha não ultrapassasse de comprimento, assegurando o formato compacto.

As respostas foram obtidas depois de 42 iterações, satisfazendo uma tolerância . Nessas condições, os parâmetros obtidos para maior eficiência são representados na Tab. 2.

Variável	Valor
Eficiência (η)	***28,573 %***
Ângulo de borda (ψ)	$64{,}5251°$
Diâmetro do coletor (d)	$12{,}501\ mm$
Comprimento focal (f)	$0{,}6137\ m$
Temperatura do ambiente (T_a)	$39{,}9969$ ℃
Temperatura do coletor (T_c)	70 ℃

Tabela 2 - Variáveis obtidas na otimização.

Com esses dados é possível definir qual será a parábola da seção através da equação 10.

$$y = 0{,}407365162x^2 \tag{10}$$

Por fim, uma maneira de calcular a quantidade de água pasteurizada é dada por uma relação entre as quantidades de calor necessárias para aquecê-la à 70 °C e manter por 15 min, condições mínimas para pasteurizar segundo (Carielo *et al.*, 2017). A energia necessária para tal (Q_e) pode ser estimada pela equação 11,

$$Q_e = mc\Delta T + \varepsilon dl\sigma\left[\frac{\left({T_{final}}^4 - {T_{inicial}}^4\right)mc\Delta T}{P_u} + {T_{final}}^4\Delta t\right] \tag{11}$$

onde m representa a massa de água tratada naquele instante, c o calor específico da água, ΔT a variação de temperatura da água, T a temperatura do coletor aquecido, Δt o intervalo de tempo associado (15 min), l e a, são respectivamente, abertura e comprimento da calha e P_u a potência média útil. Isolando a massa, tem-se:

$$m = \frac{(Q_e - \varepsilon dl\sigma {T_{final}}^4 \Delta t) P_u}{c\Delta T \left[\varepsilon dl\sigma \left({T_{final}}^4 - {T_{inicial}}^4\right) + P u\right]} \quad (12)$$

Novamente devido a premissa de ser compacta e ao fato da influência do comprimente ser trivial em comparação a seção parabólica, adotou-se um valor de 1,5 m. Em geral, a eficiência condiz com coletores de pequeno porte já desenvolvidos utilizando critérios semelhantes, como feito por (Silva, 2015) que obteve 27,7% de eficiência. Na Fig. 8, são apresentadas as quantidades de água obtidas para a calha proposta neste trabalho em função do valor médio diário de DNI para os dias com maior irradiação em cada mês do ano de 2018 para a cidade de Mossoró. Os dados foram obtidos através do *software* Radiasol 2 desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

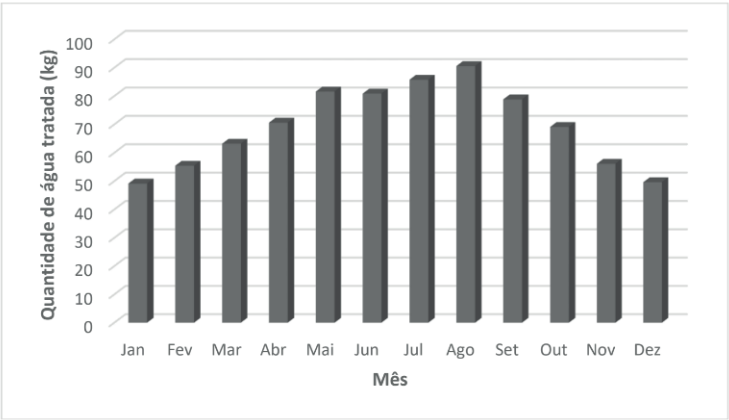


Figura 8 - Quantidade de água pasteurizada.

Bigoni *et al.* (2014) fizeram testes com pasteurização de água utilizando um coletor cilíndrico parabólico na cidade de Dübendorf na Suíça, obtendo no máximo 66 litros do líquido pasteurizado por dia, com um concentrador de 5,7 m2 de abertura e uma válvula termostática que abria a 87oC. Carielo *et al.*, usando um coletor plano de 2 m2 de área, chegaram a produzir um máximo de 80 l. Da Fig. 8 observamos que a produção teórica do pasteurizador proposto ultrapassa os 80l com a DNI diária máxima mensal em quatro meses, tendo podido chegar a 90 l no mês de agosto de 2018.

6 | CONCLUSÕES

Propõe-se um pasteurizador solar com concentrado cilíndrico-parabólico e controle automático de vazão. Apresentamos pseudocódigos usados no controle do seguidor solar e no controle automático de vazão, seguindo a proposta de Carielo *et al.* (2017) para efetivo controle de temperaturas e tempos de pasteurização. Fazendo uma otimização de parâmetros geométricos do concentrador calculamos uma eficiência ótima e calculamos a quantidade teórica máxima de água que o pasteurizador poderia produzir por dia em cada mês de 2018, com uma temperatura de pasteurização de 70ºC, chegando a um valor máximo diário de 90 l no mês de agosto de 2018.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido com o apoio da UFERSA por meio dos editais PROPPG/UFERSA 19/2018, IC 05/2018 e IC 11/2019.

REFERÊNCIAS

ANSI/ASHRAE 93-2010 (2010). **Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors**, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, p. 42.

Bigoni, R. *et al.*, 2014. **Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): flow-cytometric analysis of bacterial inactivation**, Journal of Cleaner Production, v. 67, pp. 62-71.

Borde, P., Elmusharaf, K., McGuigan K. G., Keogh, M. B., 2016. **Community challenges when using large plastic bottles for Solar Energy Disinfection of Water (SODIS)**, BMC Public Health, v.16, 931.

Carielo, G., Calazans, G., Lima, G., Tiba, C., 2017. **Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination**, Renewable Energy, v. 105, pp. 257-269.

Carielo, G.; Calazans, G.M.T.; Tiba, C., 2016. **Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water**, Renewable Energy, v. 87, pp. 711-719.

Ciochetti, David A.; Metcalf, Robert H., 1984. **Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy**, Applied and Environmental Microbiology, v. 47, n. 2, pp. 223-228.

CRESESB, 2014. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CEPEL, Rio de Janeiro.

DATASUS, 2012. **Indicadores e Dados Básicos - Brasil – 2012. Datasus**. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/idb2012/matriz.htm#mort%20>. Acesso em 17/04/2018.

Domingos, M.; Sanchez, B.; Vieira-da-Motta, O.; Samarão, S. S.; Canela, M. C., 2019**. A new automated solar disc for water disinfection by pasteurization**, Photochemical and Photobiological Sciences, v. 18, pp. 905-911.

Duff, W. S., Hodgson, D. A., 2005. **A simple high efficiency solar water purification system**, Solar Energy, v. 79, n. 1, pp. 25-32.

El Ghetany, H.H., Dayem, A., 2010. **Numerical simulation and experimental validation of a controlled flow solar water disinfection system**, Desalination and Water Treatment, v. 20, pp. 11-21.

Feachem, Richard; Mara, D. Duncan; Bradley, David J., 1983. **Sanitation and disease**. Washington DC, USA, John Wiley & Sons.

Günther, M., Joemann, M., Csambor, S., (Org.) 2016. **Parabolic Trough Technology**, Advanced CSP Teaching Materials. Deutsches Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Elektrische Energietechnik - Universität Kassel.

Jagoo, Z., 2013. **Tracking Solar Collectors: A Low Budget Solution**, pp. 54-55, Springer.

McRoberts, M., 2011. Arduino Básico - Novatec Editora.

Navntoft C.; Ubomba-Jaswa, E.; McGuigan, K.G.; Fernández-Ibáñez P., 2008. **Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminum reflectors under real conditions: natural well-water and solar light**, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, v. 93, n. 3, pp. 155–161.

Penafiel, R. A. S., 2011. **Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização**. Dissertação de Mestrado - UFRJ.

Sakhrieh, A. *et al.*, 2016. **Water disinfection using CSP technology**, International Journal of Applied Engineering Research, v. 11, n. 15, pp. 8673-8680.

Silva, L. P. L., 2015. **Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas**. Dissertação de Mestrado, UFCG.

Tyrrel, Rex M., 1976. **Synergistic lethal action of ultraviolet-violet radiations and mild heat in Escherichia coli**, Photochemistry and Photobiology, v. 24, n. 4, pp. 345-351.

CAPÍTULO 20

ESTUDO DA SECAGEM SOLAR DE BIOMASSA DE LARANJA COM CONVECÇÃO NATURAL E FORÇADA

Data de aceite: 01/05/2021

Mariana de Miranda Oliveira
Universidade Federal de São João del-Rei
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos

Leandro Antônio Fonseca Domingues
Universidade Federal de São João del-Rei
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos

Andrea Lucia Teixeira Charbel
Universidade Federal de São João del-Rei
Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos

RESUMO: Devido ao elevado custo e a agressão ambiental intrínseca ao uso de fontes não sustentáveis em processos industriais, a busca por alternativas mais ecológicas são indispensáveis. A energia solar, portanto, surge como opção de energia limpa e pode ser empregada em processos diversos. Neste trabalho, buscou-se aproveitar essa energia através de um secador solar de placa plana, visando comparar a cinética da secagem em dois processos distintos: convecção natural e convecção forçada com o auxílio de coolers para obtenção de biomassa com maior poder calorífico através da secagem de bagaço de laranja. A área total do coletor é de 1 m² e a velocidade média do ar no processo de convecção forçada foi de 2,8 m/s. O tempo de secagem médio foi igual a 1h04 e, durante todo o período, a temperatura do ar, a radiação solar e a perda de massa foram medidas a cada 2 minutos. As amostras iniciais apresentavam umidade média igual a 68% B.U. e no final do procedimento apresentaram uma redução de umidade de 35,6% (convecção natural) e 67,8% (convecção forçada). No entanto, o tempo de secagem não mostrou grandes diferenças quando comparados ambos os processos. Pôde-se concluir que os maiores níveis de temperatura alcançados na convecção natural compensaram a velocidade e a alta renovação de ar da convecção forçada. O experimento ocorreu nas dependências da Universidade Federal de São João del-Rei, em São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil.

PALAVRAS - CHAVE: Biomassa, Secagem solar, Cinética de secagem.

STUDY OF ORANGE BIOMASS SOLAR DRYING WITH NATURAL AND FORCED CONVECTION

ABSTRACT: Due to the high cost and intrinsic environmental aggression to the use of unsustainable sources in industrial processes, the search for greener alternatives is indispensable. Solar energy, therefore, emerges as a clean energy option and can be employed in various processes. In this work, we sought to harness this energy through a flat plate solar dryer, aiming to compare the drying kinetics in two distinct processes: natural convection and forced convection with the help of coolers to obtain higher calorific biomass through drying. of orange pomace. The total collector area is 1 m² and the average air velocity in the forced convection

process was 2.8 m / s. The average drying time was 1h04 and throughout the period, air temperature, solar radiation, and mass loss were measured every 2 minutes. Initial samples had an average humidity of 68% B.U. and at the end of the procedure presented a humidity reduction of 35.6% (natural convection) and 67.8% (forced convection). However, the drying time showed no major differences when comparing both processes. It was concluded that the higher temperature levels achieved in natural convection compensated for the speed and high air renewal of forced convection. The experiment took place in the facilities of the Federal University of São João del Rei, in São João del Rei, Minas Gerais, Brazil.
KEYWORDS: Biomass, Solar Drying, Drying kinetics.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em uma posição geograficamente favorável que lhe permite adotar estratégias direcionadas às políticas socioambientais, em particular no que diz respeito ao reaproveitamento da energia solar. Uma pesquisa realizada pelo instituto Tiba (2000) mostra que a radiação solar incidente em todo o território brasileiro varia entre 8 a 22 MJ/m².dia. Uma possível aplicação dessa energia, é incorporá-la nos processos de secagem para obtenção de biomassa com baixos teores de umidade.

Biomassa é toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal que possa ser utilizada como fonte energética (ANEEL, 2002), exemplos disso são o bagaço de cana e o carvão vegetal. Dentre as vantagens do uso de biomassa está seu potencial como agente diversificador da matriz energética mundial através de, por exemplo, seu aproveitamento direto por meio da combustão em caldeiras, reduzindo os impactos socioambientais (Cerqueira apud Cardoso, 2012). No entanto, a biomassa ainda possui pouca eficiência devido ao seu baixo poder calorífico e por isso se torna importante o investimento em pesquisas em torno dela. Um dos fatores que colaboram na redução de seu poder calorífico é a sua umidade. Por esse motivo, o processo de secagem dessa matéria orgânica é de primordial importância.

Segundo a Abecitrus (2008) a laranja tem em sua constituição (40-45)% de suco; (8-10)% de casca externa ou flavedo; (15-30)% de casca interna ou albedo; polpa e membranas (20-30)% e sementes (0-4)%. Assim, após a extração do suco são obtidos resíduos com alto teor de umidade (~80%) que correspondem a 50% em peso da fruta. A umidade é a responsável pela elevada fermentação do resíduo e pode causar problemas ambientais (Tripodo et al., 2004).

O processo industrial de suco de laranja gera grande quantidade de resíduos como cascas, sementes e polpa, de forma a representar fonte de fibra em potencial. Aproximadamente 50% do peso da fruta é subutilizado e rico em fibras (Santana & Gasparetto, 2009), tornando sua exploração interessante, não somente do ponto de vista econômico, como também ambiental.

Segundo Tienne (2004) o bagaço da laranja possui alto valor energético e pode

contribuir para reduzir a dependência de energia comprada para geração de calor, vapor ou eletricidade. Antes de serem utilizados na geração de energia térmica, os resíduos sólidos da laranja precisam ser secados de forma a ampliar seus usos e, ao mesmo tempo, facilitar seu transporte, armazenamento e manuseio.

Para o aproveitamento do potencial energético da biomassa pela queima ou combustão dos produtos, a secagem é etapa primordial para a eficiência do processo uma vez que, quanto menor o teor de umidade, maior a energia que pode ser liberada pelo combustível. Brand (2011) e Klautau (2008) relatam que a presença de umidade dificulta a queima, reduz o poder calorífico e, ainda, gera poluição ambiental devido ao aumento do volume de produtos de combustão e de material particulado.

A secagem é o mecanismo de retirada da umidade por aquecimento (Strumillo, Kudra, 1986). Atualmente, a secagem é feita majoritariamente por secadores industriais que utilizam fontes energéticas não sustentáveis. Uma alternativa a esse estilo de secagem é a secagem solar, que em sua forma menos complexa se resume em expor um produto diretamente ao sol. O secador solar é um coletor que aquece o ar por radiação. Esse ar aquecido, percorre o secador de forma natural ou forçada, retirando a umidade do material. Os secadores solares podem ser classificados como de convecção natural, de convecção forçada ou híbridos assim como podem ser de exposição direta ou indireta (Barbosa, 2011).

Para este estudo, foram analisadas amostras de bagaço de laranja tipo pêra, durante a secagem em secador solar plano de exposição direta, a fim de analisar a cinética de secagem e obter as curvas características do processo sob duas condições diferentes de fluxo do ar de secagem.

2 | METODOLOGIA

2.1 Preparação da amostra

Foi utilizado bagaço de laranja tipo pêra. A umidade inicial das amostras foi determinada utilizando-se o método tradicional através da secagem em estufa, onde a amostra, em triplicata, é mantida exposta à temperatura de 105°C, por 24h, segundo o estabelecido pela AOAC – Association of Official Agricultural Chemists (Dias, 2013). Decorridas então as 24h, a massa de água é determinada pela diferença entre a massa do corpo de prova no início da secagem e a massa seca ao final do processo. Os resultados indicaram valores de umidade de 70,7%, 65,5% e 68,1% nas três amostras, resultando numa umidade média, em base úmida, de 68,1%.

Para realização do experimento, três amostras de bagaço de laranja previamente picadas em pequenos pedaços aproximadamente cúbicos de 5mm de lado e uniformes foram secas em convecção natural e outras três em convecção forçada. O bagaço da laranja utilizado foi disposto em peneiras metálicas que permitiam a livre circulação do ar

aquecido sobre toda a amostra.



Figura 1 - Secador solar plano de exposição direta

2.2 Procedimento experimental de secagem

Os testes foram realizados na cidade de São João del-Rei (MG) entre 9h da manhã e 15h da tarde durante os meses de agosto e novembro de 2019 nas dependências da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), localizada a 21°08'27.9"S e 44°15'41.1"W.

O secador solar utilizado foi do tipo plano de exposição direta (Fig. 1) com dimensões 1m *x*1m x 0,2m (largura x profundidade x altura), coberto com vidro comum, isolado e tendo, na base interna, uma placa absorvedora de metal lisa, pintada na cor preta. Foram acoplados a ele 6 coolers de 12V, todos com 60 mm de diâmetro, sendo os 3 da saída com suas velocidades controladas por um potenciômetro. A velocidade utilizada nos experimentos de convecção forçada foi de 2,8 m/s, correspondente à máxima velocidade alcançada pelo cooler.

Durante os experimentos, as amostras foram pesadas a cada 2 minutos. O procedimento consistia na abertura de uma porta lateral do secador para retirada de cada amostra, que era mantida fechada enquanto a pesagem era feita a fim de diminuir a perturbação do sistema interno do secador. Durante todo o experimento, sensores DHT22 conectados a uma placa *Arduino®* forneciam as leituras da temperatura ambiente e em outros 5 pontos dentro do secador em tempo real. Os dados de leitura dos sensores foram integrados ao PLX-DAQ (*Parallax Data Acquisition tool*) que os organizava em uma planilha *Excel®*. O valor da radiação foi obtido pelo instrumento SM206, posicionado paralelo à

superfície do secador. Na Tab. 1 tem-se as características de cada instrumento utilizado nos experimentos.

Instrumento	Marca e/ou modelo	Escala	Precisão
Sensor de temperatura	DHT22	-40 ~ 80°C	±0,5°C
Anemômetro	ICEL WM-1850	0,4~30,0 m/s	± 3% F.E.
Medidor de energia solar	SM206	1 ~ 3999 W/m²	±10 W/m²
Balança digital	Digital Scale	0,01 ~ 500g	0,01g

Instrumento Marca e/ou modelo Escala Precisão Sensor de temperatura DHT22 -40 ~ 80°C ±0,5°C

Anemômetro ICEL WM-1850 0,4~30,0 m/s ± 3% F.E. Medidor de energia solar SM206 1 ~ 3999 W/m² ±10 W/m² Balança digital Digital Scale 0,01 ~ 500g 0,01g

Tabela 1 - Especificações dos instrumentos de medição.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos da comparação entre secagem por convecção natural e forçada podem ser vistos a seguir. Na Fig. 2 (a), é possível observar que, nos primeiros 30 minutos de experimento, para um mesmo valor da razão de umidade (MR), a velocidade do ar constante em função do processo de convecção forçada, diminuiu o tempo de secagem comparativamente à curva de secagem natural. Porém, esta redução não se mostrou mais significativa devido a diferença das temperaturas, linhas tracejadas, atingidas em ambos os processos de secagem. Os maiores valores de temperatura no processo de secagem por convecção natural compensaram os efeitos decorrentes do fluxo constante de ar presente no processo de convecção forçada. No entanto, na Fig. 2 (b), nota-se que a umidade na convecção natural atinge valores constantes antes da convecção forçada, isso ocorre devido à saturação do ar de secagem, não permitindo a retirada de mais umidade da amostra. Na convecção forçada, como o ar era renovado a todo instante, foi possível atingir valores muito menores para a umidade final.

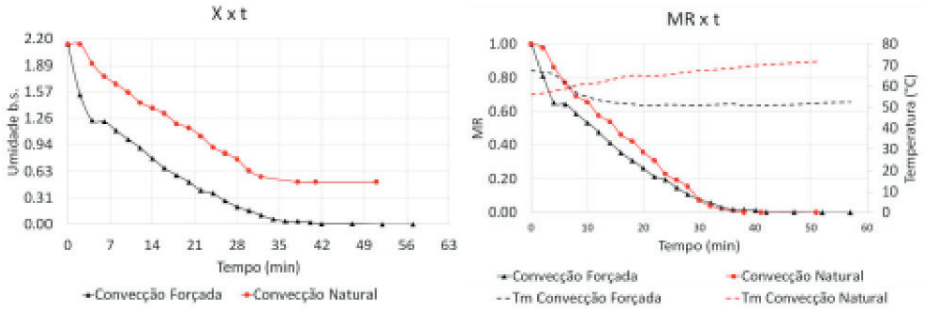


Figura 2 - Análise temporal da umidade.

Verifica-se ainda, na Fig. 3, que é possível identificar, apesar da instabilidade característica do processo solar os períodos de ajuste, de taxa constante e de taxa decrescente de secagem. No início do período constante, a amostra em convecção natural possuía 63,7% bu (ou 1,75 bs) e a amostra avaliada em convecção forçada, 52,7% ou 1,11 bs. Este período durou aproximadamente 24 minutos no regime natural e aproximadamente 8 minutos no regime forçado, resultando em uma redução de 24,8% e 12,4% de umidade em base úmida, respectivamente. A taxa de secagem média do período constante nos processos com convecção natural e forçada foram iguais a, respectivamente, 0,063 e 0,065 g/min.

No período decrescente, onde ocorre majoritariamente a remoção da umidade ligada, correspondente àquela que apresenta menor pressão de vapor e, portanto, de mais difícil remoção, houve uma redução de 2,8% dessa umidade no processo natural e 36,8% em convecção forçada, ambas em base úmida. Essa diferença indica que as condições de operação influenciam na umidade de equilíbrio final. As condições de equilíbrio são alcançadas quando não há mais força motriz que promova a remoção da umidade. Assim, é possível atingir valores menores de umidade no processo com convecção forçada.

No final dos testes, obteve-se uma redução total de 35,6% de umidade em base úmida no processo de convecção natural e 67,8% de umidade em base úmida no processo de convecção forçada.

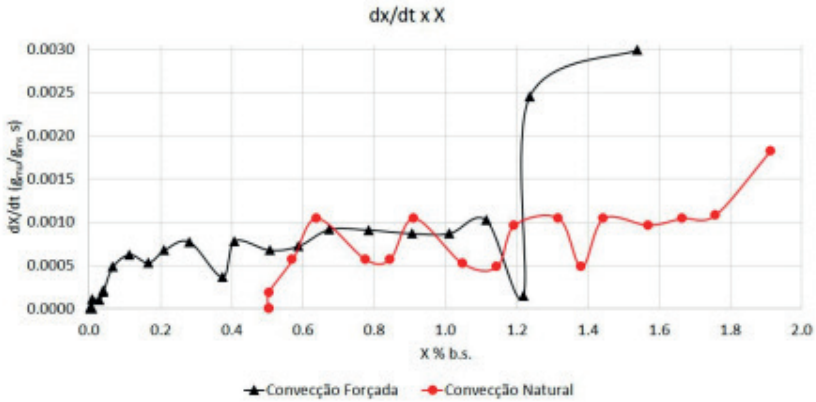


Figura 3 - Taxa de secagem *x* Umidade em base seca.

Comparativamente, pode-se ver na Fig. 4, que os primeiros 7 minutos de secagem são caracterizados pelo período de ajuste para ambos os tipos de convecção. Nos próximos 10 minutos, houve um breve período de taxa constante devido à eliminação de umidade não ligada, e a partir daí (em aproximadamente 17 minutos do início da secagem), tem-se o período decrescente, a umidade crítica média foi 55,6%.

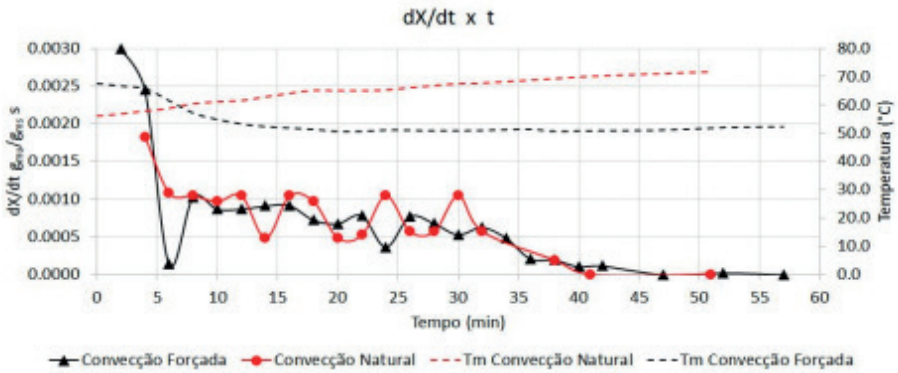


Figura 4 - Taxa de secagem x tempo

Como os experimentos ocorreram em dias diferentes, na Fig. 5, é possível ainda comparar a irradiação solar, a temperatura média dentro do secador e a temperatura ambiente durante os testes. É evidente a diferença entre a temperatura média e a temperatura ambiente em ambos os casos. O sistema de ventilação da convecção forçada reduziu em aproximadamente 13,2 °C a temperatura média dentro do coletor solar.

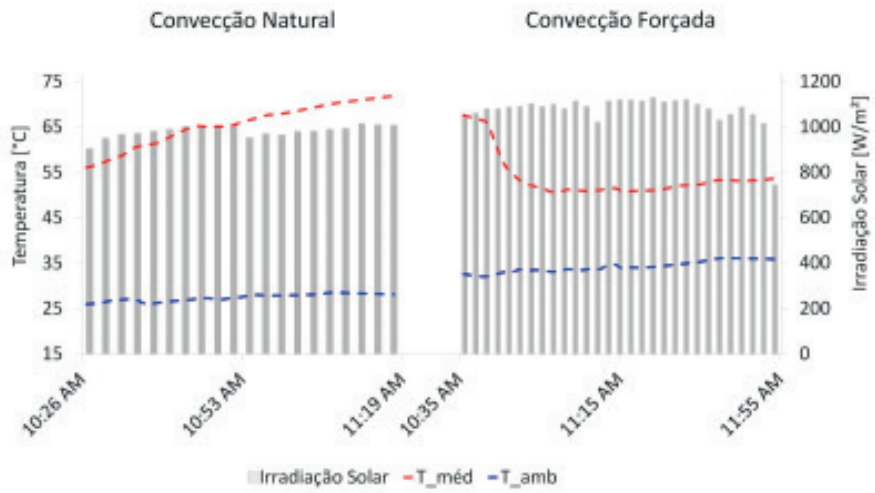


Figura 5 - Irradiação Solar ao longo do experimento de secagem.

A radiação média foi igual a 985 w/m² e 1090 w/m², respectivamente, nos testes em convecção natural e forçada. Foram realizados mais outros dois experimentos em regime de convecção natural e mais um em convecção forçada, totalizando cinco secagens. A Fig. 6 mostra a razão de umidade e a temperatura média para cada experimento. Nela é possível perceber que a amostra de secagem natural que tem início às 12h10 apresenta a melhor redução da razão de umidade ao longo do tempo comparativamente a de convecção forçada. Isso ocorre devido aos altos níveis de temperatura e irradiação solar desse período do dia.

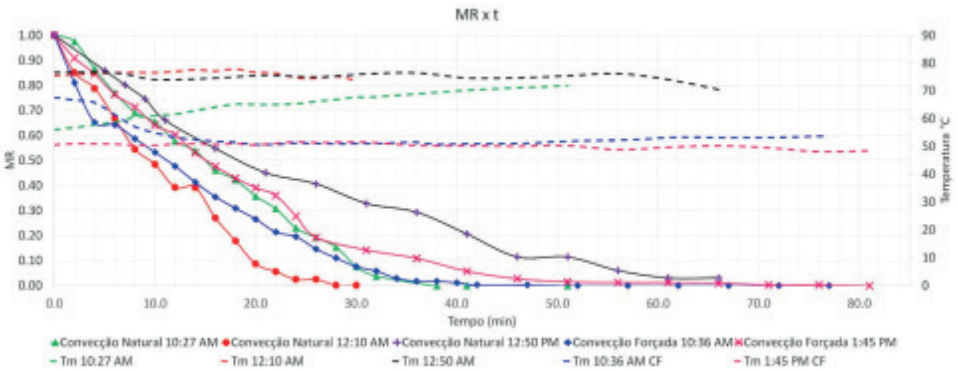


Figura 6 - Razão de umidade e temperatura

4 | CONCLUSÃO

A secagem solar foi analisada neste artigo a fim de comparar seu comportamento em diferentes tipos de convecção. Assim, amostras de bagaço de laranja picados uniformemente foram secadas em um secador plano de exposição direta com convecção natural ou forçada. No fim, contabilizou-se uma redução de 35,6% da umidade em base úmida em secagem com convecção natural e 67,8% em convecção forçada. Além disso, notou-se uma diminuição do tempo de secagem em convecção forçada em relação com a natural, não sendo maior ainda essa diferença em razão da alta temperatura média do processo em convecção natural compensar a maior renovação do ar da forçada. No entanto, justamente por possuir maior renovação que impedia a saturação do ar, a convecção forçada permitiu que se alcançasse menores valores de umidade. Os resultados sugerem que um processo combinado seria adequado, utilizando convecção natural no período com maior radiação solar e convecção forçada nos períodos de menor radiação do dia ou quando do início do período decrescente, onde a taxa de remoção de umidade é baixa.

Para estudos futuros, sugere-se acrescentar células de carga ao secador para que a medição das amostras sejam instantâneas e não seja necessário abrir o secador mesmo que por pouco tempo e perder energia térmica. Uma outra sugestão seria a realização de experimentos combinados com convecção forçada nos períodos de maior radiação do dia e nos períodos de menor radiação, já que a secagem solar com convecção natural obteve tempo de secagem significativamente próximo ao de convecção forçada em períodos com maior radiação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de São João del Rei pelo espaço de aprendizado, estrutura de pesquisa e apoio financeiro, sem os quais esta pesquisa não teria sido possível.

REFERÊNCIAS

Abecitrus, História da Laranja e Subprodutos da Laranja, Disponível em: http://www.abecitrus.com.br/. Acessado em: outubro de 2019.

Aneel. Atlas de energia elétrica do Brasil. ANEEL, 2002, Brasília. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf. Acessado em: outubro de 2019.

Barbosa, J. R. P.,2011. Estudo da viabilidade de uso de secadores solares fabricados com sucatas de luminárias. 82f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de do Rio Grande do Norte.

Brand, M. A. Fontes de Biomassa para a Geração de Energia. Disponível em: http: <http://www.solumad.com.br/artigos/201011171818441.pdf . Acessado em: outubro de 2019.> Cardoso, B. M., 2012. Uso da Biomassa como Alternativa Energética. 112f. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Dias, L. G. Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Microondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São João del-Rei, 2013. Klautau, J. V. P. Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Co-corrente Para Secagem de Grãos. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008. Santana, M.F.S.; Gasparetto, C.A. Microestrutura da fibra alimentar do albedo de laranja: um estudo por técnicas físicas e análise de imagens. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.29, n.1, p.124-134, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612009000100020>. Acessado em: outubro de 2019.

Strumillo, C. e Kudra, T., 1986. Drying Principles, Applications and Design, Gordon and Breach Science Publ., Londres.

Tiba, C. et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife-PE: Ed. Universitária da UFPE, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br.> Acessado em: novembro de 2019.

Tienne, L; Deschamps, M. C; Andrade, A. M., 2004. Produção de carvão e subprodutos da pirólise da casca e do bagaço de laranja (Citrus sinensis), Revista Biomassa e Energia. 1, 191-197.

Tripodo, M. M.; Lanuzza, F. Micali, G.; Coppolino, R.; Nucita, F. Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. Bioresource Technology, v.91, p.111-115, 2004.

CAPÍTULO 21

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 04/02/2021

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

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

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

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

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

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

KEYWORDS: Solar dryer, Heat conduction, Mathematical modeling.

1 | INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

2 | MODELO MATEMÁTICO

2.1 Protótipo e experimentos

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

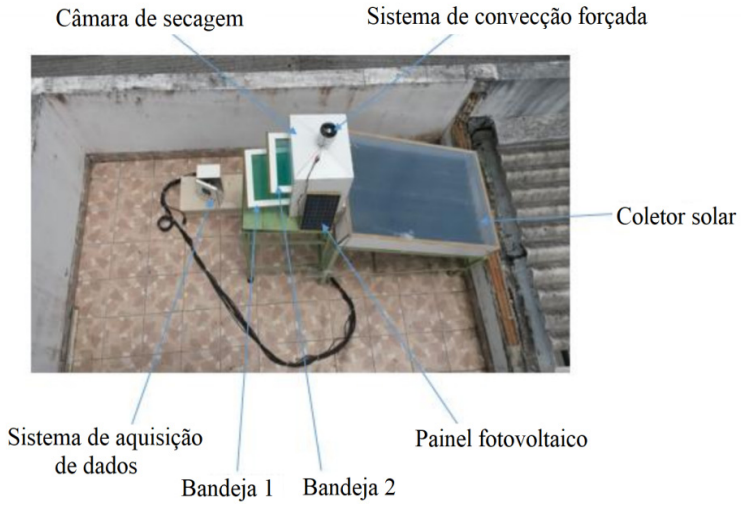


Figura 1 - Vista de cima do coletor solar com indicação de cada componente (NUNES, 2018).

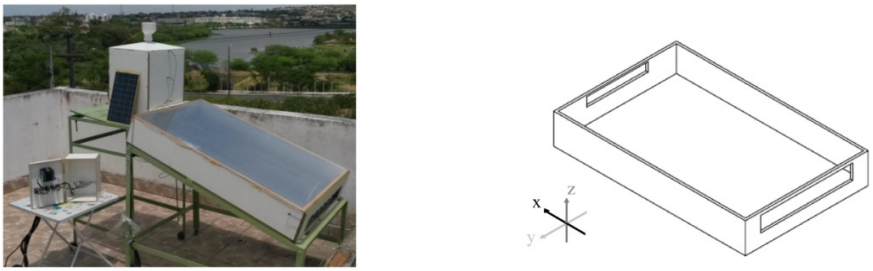
Os testes com o protótipo foram realizados no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), situado na cidade de Campina Grande no estado da Paraíba. Foram realizados quatro experimentos de secagem de bananas do tipo prata, tendo sido o primeiro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

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

2.2 Considerações de eixo de condução e formato da telha

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

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

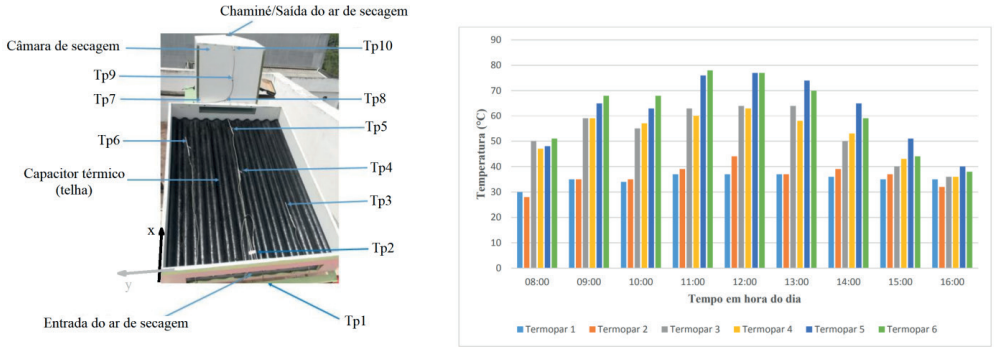


(a) (b)

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

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

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



(a) (b)

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

2.3 Equação da condução de calor

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

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

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

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

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

Onde α é a difusividade térmica do material, dada pelo quociente da condutividade (k) pelo produto entre densidade e calor específico do material (*p.c*)

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

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

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

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

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

Onde a difusividade térmica é dada por α = 0,0005952 m²/s (ABNT, 2005) e *E(t)* corresponde à equação de geração de energia na placa, adotada para que fossem inclusos os efeitos da irradiação solar. A função *E(t)* é diretamente proporcional à irradiação solar variante com o tempo *I(t)* e à eficiência do coletor ε, e é inversamente proporcional à densidade e ao calor específico do fibrocimento – material que compõe a telha. Tem-se, portanto que, *Eq.* (4):

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

Para a densidade do fibrocimento foi adotado o valor ρ = 1900 kg/m³ (ABNT, 2005). O calor específico do fibrocimento foi considerado *c* = 0,84 J/kg·K (ABNT, 2005). O valor adotado para a eficiência do coletor ε = 19,89% levou em consideração a média das eficiências calculadas por Nunes (2016) para cada experimento realizado.

Para a obtenção da função de irradiação *I(t)* foram utilizados os dados de irradiação média coletados a cada hora nos nove dias de experimento (Tabela 1). Na função, a unidade de irradiação é W/m² e o tempo é dado em segundos. Foi considerado como tempo inicial o horário de início dos experimentos (8h00min).

Tempo (s)	Irradiação Solar (W/m²)									
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	MÉDIA
0	400	430	675	680	575	675	670	370	430	545,000
3600	780	595	820	830	850	830	840	450	780	752,778
7200	980	790	720	720	1020	725	725	565	920	796,111
10800	980	1000	1000	1010	1050	1010	1005	810	900	973,889
14400	985	1000	980	970	950	980	980	750	660	917,222
18000	760	670	950	920	650	925	930	800	720	813,889
21600	820	420	780	775	650	780	780	410	630	671,667
25200	590	460	600	600	520	600	610	300	580	540,000
28800	225	225	260	270	240	270	260	200	190	237,778

Tabela 1 - Processamento dos dados experimentais de irradiação solar.

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

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

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

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

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

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

CONDIÇÃO DE CONTORNO: ENTRADA DO AR (Tp1)										
Tempo (s)	Temperaturas (ºC)									TEMPERATURA MÉDIA (K)
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	
0	27	28	29	30	27	29	26	29	27	301,15
3600	32	31	34	35	34	33	32	31	33	305,9278
7200	33	32	35	34	35	34	34	34	34	307,0389
10800	34	35	36	37	35	37	35	35	36	308,7056
14400	36	35	36	37	35	37	35	34	36	308,8167
18000	35	35	35	37	36	37	36	35	37	309,0389
21600	35	34	35	36	35	36	37	36	38	308,9278
25200	33	34	–	35	35	34	36	35	38	308,15
28800	33	34	33	35	34	–	36	–	36	307,5786
CONDIÇÃO DE CONTORNO: SAÍDA DO AR (Tp7)										
Tempo (s)	Temperatura (ºC)									TEMPERATURA MÉDIA (K)
	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	
0	34	30	40	41	33	38	31	39	36	308,9278
3600	46	45	49	52	46	47	42	46	54	320,5944
7200	51	42	52	52	56	50	48	47	55	323,4833
10800	52	55	53	58	57	53	52	58	52	327,5944
14400	50	55	55	59	55	55	55	52	48	326,9278
18000	45	49	51	57	52	48	46	54	52	323,5944
21600	40	43	46	50	52	42	46	41	52	318,9278
25200	37	37	38	43	44	37	45	38	46	313,7056
28800	34	39	47	37	38	–	37	–	37	311,5786

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

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

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

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

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

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

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

Tabela 3 - Dados referentes à condição inicial.

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

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

2.5 Modelo matemático e método de resolução da equação diferencial parcial

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



Figura 4 - Desenho esquemático referente à modelagem do problema.

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

$$T(x,t) = S(x,t) + U(x,t) \tag{10}$$

Onde:

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

Desta forma:

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

Portanto:

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

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

$$U(0,t) = U(L,t) = 0 \tag{14}$$

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

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

Como condição inicial, tem-se:

$$U(x,0) = \varphi(x) - S(x,0) \tag{16}$$

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \tag{17}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Portanto,

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

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

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

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

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

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

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

2.6 Plotagem da solução e comparação com os dados experimentais

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

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

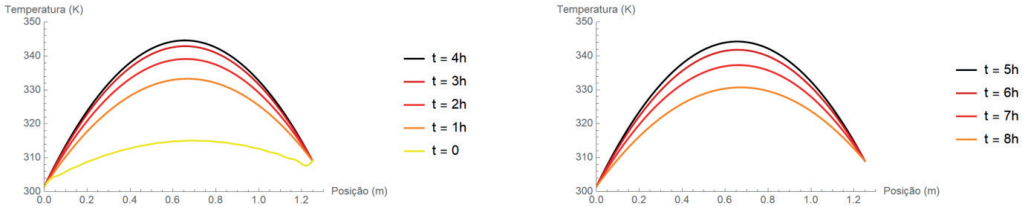


Figura 5 - Gráficos de temperatura (K) em função da posição (m) plotados no software *Mathematica* para os períodos de (a) aquecimento da telha e (b) resfriamento da telha.

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

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

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

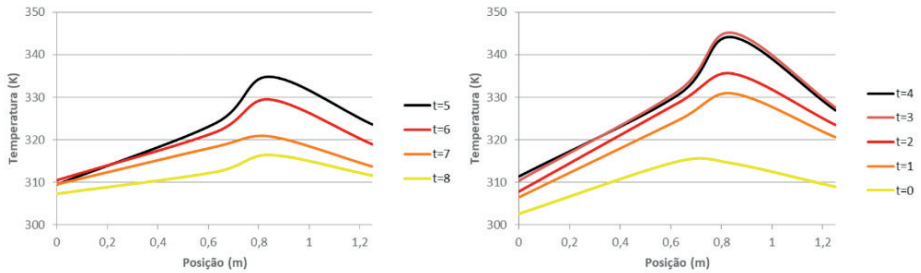


Figura 6 - Gráficos de temperatura (K) em função da posição (m). Linhas de tendência plotadas com base nos dados experimentais

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

3 | CONCLUSÕES

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

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

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

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO 22

MODELAGEM E CONTROLE DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DO TIPO GANGORRA DE EIXO ÚNICO

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 14/03/2021

Reinel Beltrán Aguedo
Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/2770313428458626

Ricardo José de Farias Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/6369929367772349

Ania Lussón Cervantes
Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho
Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco
http://lattes.cnpq.br/5793691069517813

RESUMO: Neste artigo, se apresentam a modelagem e o controle de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único. O atuador consiste em uma hélice acoplada a um motor BLDC, para gerar o impulso necessário para estabilizar a plataforma no ângulo de inclinação desejado. A modelagem é realizada usando equações fenomenológicas para o atuador e a gangorra, onde os parâmetros aerodinâmicos das hélices são estimados a partir dos testes de empuxo do conjunto motor-hélice. O conhecido controlador PID é usado como algoritmo de controle. O Matlab/Simulink é empregado para realizar o ajuste do controlador e as simulações em malha fechada. Os ensaios experimentais são realizados embarcando o controlador no microcontrolador a bordo do protótipo. Os resultados de simulação são comparados com os experimentais para verificar o desempenho do algoritmo de controle. Finalmente, esta plataforma pode ser usada para o controle de *roll* e *pitch* de veículos aéreos não tripulados (VANT´s) e para o ensino abordando temas de modelagem e controle de sistemas dinâmicos.

PALAVRAS - CHAVE: Controlador PID; *Seesaw Propeller*; VANT; Controle de sistemas; Motor BLDC.

MODELING AND CONTROL OF AN EXPERIMENTAL SINGLE-AXIS SEESAW PLATFORM

ABSTRACT: In this article, the modeling and a control of a single-axis seesaw platform are presented. The actuator consists of a propeller coupled to a BLDC motor, to generate the necessary thrust to stabilize the platform at a desired angle of inclination. The modeling is performed using phenomenological equations for both the actuator and the seesaw, where propellers aerodynamic parameters are estimated from the thrust tests of the motor-propeller assembly. The well-known PID controller is used as the control algorithm. The Matlab/Simulink is used to adjust the controller and closed loop simulations. Experimental tests are performed by loading the controller into the

microcontroller on board the prototype. Simulation results are compared with the experimental ones to verify the performance of the control algorithm. Finally, the platform can be used to control the roll and pitch movement of unmanned aerial vehicles and for teaching addressing themes of modeling and control of dynamic systems.
KEYWORDS: PID controller; Seesaw Propeller; VANT; Systems control; BLDC motor.

1 | INTRODUÇÃO

Os veículos aéreos não tripulados (VANT's), também chamados de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ou drones, tem tido um aumento significativo em seu uso, como por exemplo, na agricultura de precisão, na fiscalização dos recursos hídricos, na supervisão de linhas de transmissão, de dutos de fluidos e gases, na supervisão do tráfego urbano, na proteção de fronteiras, no mapeamento do desmatamento na Floresta Amazônica, e até para bombardear inimigos (Goodarzi F. et al. 2014), (Luna T. L. et al. 2011), (Shukla A. et al. 2016), (Shakhatreh H. et al. 2019), (Wang B. et al. 2010).

Os UAV's podem ser classificados em dois grandes grupos: asas fixas e asas rotativas. Dentro do segundo grupo estão os multirotores, e em particular, o quadrirotor tem sido um dos mais populares, o qual usa quatro rotores de empuxo vertical para sua propulsão, colocados, normalmente, nas extremidades da estrutura, e no centro dela toda a lógica de medição e controle. Eles são caracterizados pela alta manobrabilidade, podendo decolar e pousar em espaços reduzidos, além de subir e descer verticalmente. Desde o ponto de vista dinâmico, possuem um comportamento inerente não-linear e instável, resultando em uma dinâmica complexa. Estes fatos, junto ao auge no uso em diversas aplicações e áreas, tem gerado grande interesse na comunidade científica, onde pesquisas são voltadas a otimizar o seu desempenho, partindo desde seu desenho mecânico até o desenvolvimento de estratégias de controle de posicionamento, pouso, decolagem e seguimentos de trajetórias de forma precisa e com uma ótima rejeição às perturbações do meio (Santana, L. V. et al. 2012), (Gomes, L. L. et al. 2014), (Mohamed A. M. A. 2019), (Ben Moussa Sellali B., et al. 2017).

Por outro lado, plataformas de laboratório de UAV's são relativamente custosas e complexas, as quais exigem amplos espaços para operar, restrições de manobrabilidade e segurança. Neste sentido se faz necessário poder contar, a nível de laboratório, com plataformas básicas para testar e avaliar projetos de controle, evitando ou minimizando possíveis danos físicos uma vez que o controlador de voo seja embarcado no protótipo final da aeronave.

Na literatura reportam-se vários trabalhos, como por exemplo, Erol U., et al. (2012) apresentam o projeto e controle de posição de uma plataforma do tipo gangorra, cujo movimento angular é medido por um codificador e controlado por um propulsor em um dos extremos do sistema. Como algoritmo de controle é usado o PID padrão e suas variantes proporcional (P), proporcional-integrativo (PI) e proporcional-derivativo (PD). Resultados de

simulação são comparados com os experimentais para avaliar as estratégias de controle. Também estudaram o efeito da hélice no comportamento do sistema como um todo.

Em Kim, J. et al. (2012) se expõe a construção de uma plataforma do tipo gangorra com dois propulsores, para estudar e avaliar o projeto de controladores de atitude. A resposta do sistema é obtida usando um controlador P e um PD para agregar amortecimento ao sistema controlado. Os resultados de simulação são comparados com os experimentais, verificando o desempenho dos controladores. Por outro lado, Mohammad H. et al. (2019) descrevem a dinâmica e o controle de atitude de uma plataforma do tipo gangorra com dois propulsores. Como controlador é usado o algoritmo PID, o qual foi sintonizado experimentalmente via prova e erro. Resultados mostraram a efetividade deste para o controle de rolagem e arfagem em UAV's.

Finalmente, Nils G., et al. (2012) oferecem uma ferramenta educativa e de desenvolvimento do tipo gangorra que permite avaliar sistemas de controle aviônico. O sistema é monitorado em tempo real por um painel de controle implementado no LabVIEW e podem ser considerados dois casos: o primeiro permite a estabilização do sistema em uma inclinação desejada, ajustando os parâmetros do PID baseado na resposta temporal. O segundo considera dois atuadores, onde é possível sintonizar o PID para a estabilização em uma inclinação desejada, além de uma velocidade requerida no sistema. A ferramenta possibilita familiarização com o sensor de inclinação e sua calibração para melhorar a qualidade dos dados medidos.

Assim, o presente artigo tem como objetivo a modelagem e o controle de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único (*seesaw propeller*) como o intuito de realizar estudos básicos de atitude em UAV's. Este tipo de plataforma também é de grande utilidade no ensino no que tange à modelagem e controle de sistemas dinâmicos.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelagem do sistema *Seesaw Propeller*

O sistema *seesaw propeller,* veja a Figura1, consiste em uma plataforma do tipo gangorra de eixo único, onde em uma de suas extremidades é acoplado um propulsor, a fim de controlar a posição da haste.

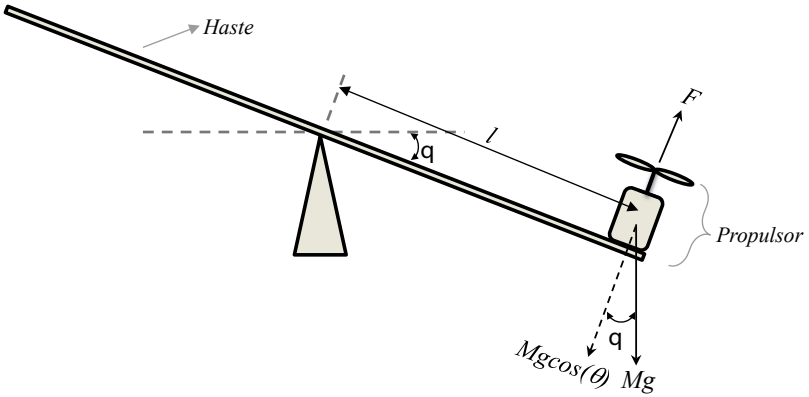


Figura1- Seesaw propeller

Fonte: Autoria própria

O propulsor é formado por um motor de corrente contínua sem escovas (BLDC), acoplado a uma hélice, de forma a gerar a força de empuxo, *F*, que atua para manter a plataforma equilibrada em uma determinada posição angular, *q*, com relação à horizontal. No modelo, *M* representa a massa do motor, *l* a metade do comprimento da distância entre o centro do propulsor e o apoio da gangorra, e *g* a aceleração da gravidade.

O movimento da haste é descrito pelo torque em torno do seu centro. Assim, um modelo não linear que descreve a dinâmica do sistema é dado por:

$$J_G \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = l\left(F(t) - Mg\cos\theta(t)\right) \qquad (1)$$

em que J_G é o momento de inércia do sistema.

A equação da dinâmica da hélice é definida como (Takashi et al. 2014):

$$J_h \frac{d\omega_h(t)}{dt} = F(t) - Q(t) \qquad (2)$$

onde J_h é o momento de inércia da hélice, *F* a força de empuxo e *Q* o contra-torque.

Tanto a força de empuxo como o contra-torque podem ser definidos em função dos parâmetros da hélice como a seguir:

$$F(t) = \frac{C_T \rho D_P^4}{4\pi^2}\omega_h^2(t) \qquad (3)$$

$$Q(t) = \frac{C_D \rho D_P^5}{4\pi^2}\omega_h^2(t) \qquad (4)$$

nas quais, C_T é o coeficiente de empuxo, C_D o coeficiente de arrasto, r a densidade do ar, D_P o diâmetro da hélice e w_h a velocidade angular da hélice.

Por outro lado, a potência consumida pelo motor ao girar a hélice é (Barnes W. M. 1995).

$$P(t) = \frac{C_P \rho D_P^5}{8\pi^3} \omega_h^3(t) \qquad (5)$$

onde C_P é o coeficiente de potência do motor, o qual segundo pode ser relacionado ao C_Q como da seguinte forma:

$$C_P = 2\pi C_Q \qquad (6)$$

Como visto, a força de empuxo e o contra-torque podem ser obtidos de forma analítica, mas dependem de coeficientes que sua determinação não é simples, já que estes, por sua vez, vão depender da geometria, dos efeitos aerodinâmicos e mecânicos das hélices e do motor usados, porém nem sempre condizem com a realidade. Não obstante, tais coeficientes podem ser determinados por meio de testes experimentais de maneira razoável.

Os motores BLDCs são amplamente usados na construção de UAV's multirotores já que apresentam alta eficiência, pouca geração de calor e uma boa controlabilidade. Na bibliografia existem diversas maneiras de descrever o funcionamento de um motor, para determinar as equações que regem este, foi adotada uma modelagem baseada nas equações fenomenológicas para um motor de corrente continua (CC), que consiste em uma resistência em série com uma indutância, à qual se aplica uma entrada (V_s), bem como é levado em consideração as propriedades mecânicas do motor, ver Figura 2.

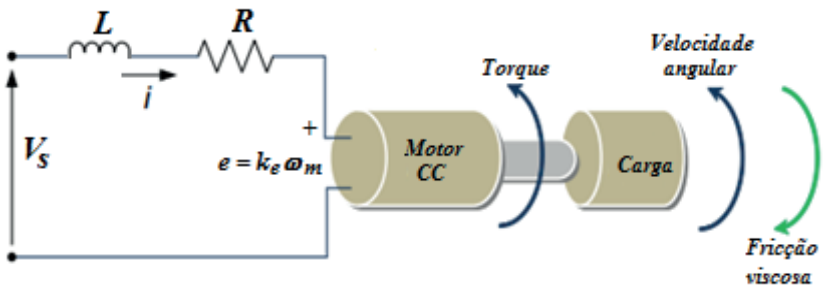


Figura 2 - Diagrama em blocos de um motor BLDC

Fonte: Adaptado de Oguntoyinbo, O. J. 2009

Portanto, a partir da Lei de Kirchhoff aplicada ao circuito e da aplicação da segunda Lei de Newton considerando as propriedades mecânicas do motor, como torque, velocidade angular e momento de inércia, obtém-se as seguintes equações:

$$L\frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e\omega_m(t) + V_s(t) \qquad (7)$$

$$J_m\frac{d\omega_m(t)}{dt} = k_t i(t) - k_f\omega_m(t) - T_L(t) \qquad (8)$$

onde R é a resistência da armadura e L sua indutância, i a corrente de armadura, w_m a velocidade angular do motor, J_m o momento de inércia do rotor, k_f, k_t e k_e as constantes de atrito, torque e força contra-eletromotriz, respectivamente, $T_L(t)$ o torque de carga, que nesse caso é o torque produzido pelo arrasto da hélice, assim $T_L(t) = Q(t)$. Considerando J como sendo o momento inercia do conjunto motor-hélice e $w_m = w_h = w$, então:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_t V_s(t)}{JR} - \left(\frac{k_t k_e + Rk_f}{JR}\right)\omega(t) - \frac{C_D\rho D_P^5}{4\pi^2}\omega^2(t) \qquad (9)$$

Na Figura 3 se representa o diagrama em blocos do conjunto motor-hélice conforme descrito em (9).

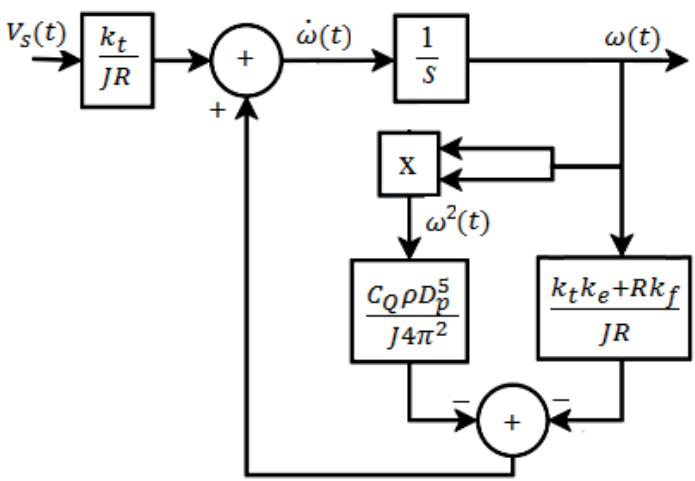


Figura 3 - Diagrama em blocos do conjunto motor-hélice

Fonte: Autoria própria

Finalmente pode-se relacionar as equações anteriormente apresentadas, a fim de obter que descreve o funcionamento do sistema apresentado na Figura 1. Tendo em vista que *F(t)* é a força de empuxo resultante do movimento do conjunto motor-hélice, é possível utilizar (3) em (1):

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{l}{J_G}\left(\frac{C_t \rho D_p^4 \omega^2(t)}{4\pi^2} - Mg\cos\left(\theta(t)\right)\right). \qquad (10)$$

2.2 Controlador PID

O controlador PID é muito utilizado, tanto no meio acadêmico, quanto industrial, onde mais da metade dos controladores em uso atualmente emprega controladores PID ou PID modificado (Ogata, K. 2010). A forma mais frequentemente encontrada na indústria é a chamada forma padrão como mostrado em (11).

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \qquad (11)$$

em que *u* é a saída, *e* o erro, K_p, T_i e T_d são o ganho proporcional, o tempo integral e derivativo, respectivamente.

Uma importante observação é que ao termo derivativo não é aplicado na forma pura, pelo fato deste amplificar ruídos, bem como também não poder ser implementado fisicamente. Assim, se aplica um filtro na ação derivativa, como mostrado em (12) no domínio de Laplace.

$$U(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N}\right)E(s) \qquad (12)$$

onde *N* é um parâmetro de ajuste do filtro, tipicamente entre 2 e 20 (Åström, K. J. et al. 1995).

Para implementar a equação do controlador PID em um microcontrolador, é necessário que (12) seja reescrita em sua forma discreta. Assim, o controlador PID foi discreto considerando a aproximação derivativa (*backward difference*) pelo de possuir bons resultados para todos os valores de T_d, incluindo $T_d=0$ (Åström, K. J. et al. 1995).

$$\begin{aligned} u(kh) = {} & t_0 y_{sp}(kh) + t_1 y_{sp}(kh-h) + t_2 y_{sp}(kh-2h) \\ & - s_0 y(kh) - s_1 y(kh-h) - s_2 y(kh-2h) \\ & + \left(1 + a_d\right)u(kh-h) - a_d u(kh-h) \end{aligned} \qquad (13)$$

com

$$
\begin{aligned}
&s_0 = K_p + b_{i1} + b_d; \;\; s_1 = -K_p\left(1 + a_d\right) - b_{i1}a_d + b_{i2} - 2b_d;\\
&s_2 = K_p a_d - b_{i1}a_d + b_d;\\
&t_0 = K_p b + b_{i1}; \;\; t_1 = -K_p b\left(1 + a_d\right) - b_{i1}a_d + b_{i2};\\
&t_2 = K_p b a_d - b_{i2}a_d;\\
&b_{i1} = K_p h/T_i; \;\; b_{i2} = 0; \;\; a_d = T_d/\left(T_d + Nh\right);\\
&b_d = K_p T_d N/\left(T_d + Nh\right).
\end{aligned}
\tag{14}
$$

onde y_{sp} e y são a entrada de referência e a saída do sistema, respectivamente, b é uma constante de ponderação de referência e h é o tempo de amostragem.

3 I DESCRICÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Os componentes principais da plataforma são uma hélice acoplada a um motor BLDC, um controlador eletrônico de velocidade (ESC), uma unidade de medição inercial (IMU), um microcontrolador e o suporte. A Figura 4 mostra a plataforma experimental e na Figura 5 o diagrama em blocos do circuito elétrico.

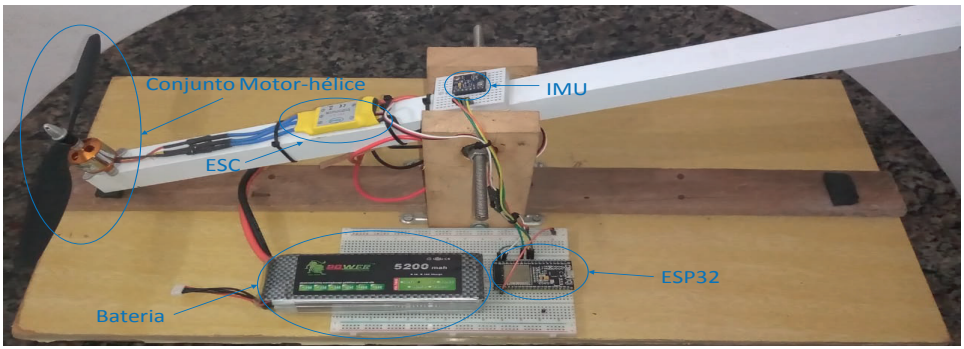


Figura 4 - Plataforma experimental do sistema

Fonte: Autoria própria

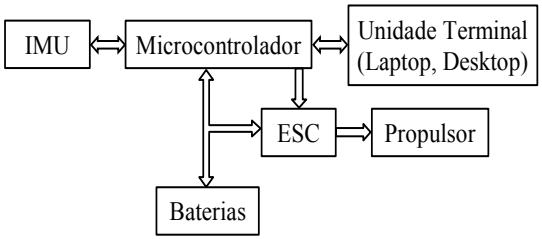


Figura 5 - Diagrama em blocos do circuito elétrico

Fonte: Autoria própria

Na Figura 6 são mostrados os componentes eletrônicos na construção da plataforma experimental. O motor BLDC é o modelo A2212/13T de 1000 KV, e para controlar a sua velocidade é usado um ESC. Para este modelo de motor, o fabricante sugere o uso de um ESC de 30 A, e também as hélices modelo EPP1045. Como microcontrolador foi escolhido a ESP32, destacando-se por seu poder de processamento, baixo custo, e por possuir Wi-Fi e Bluetooth integrados, facilitando seu uso. As fontes de alimentação usadas são duas baterias, uma de 5200 mAh para alimentar os propulsores, e outra de 1000 mAh para alimentar o microcontrolador e a IMU. A IMU é o multi-sensor GY-87, o qual chega a 10 DOF (*Degree Of Freedom*), capaz de medir a velocidade angular, a orientação e as forças gravitacionais de um objeto em movimento através de um acelerômetro e giroscópio triaxial MPU-6050, um magnetômetro triaxial HMC5883L, e um sensor de pressão e temperatura BMP180.



Figura 6 – Componentes

Fonte: Sites dos próprios fabricantes

Para o sistema é usado os dados fornecidos pelo giroscópio e acelerômetro na obtenção do ângulo de inclinação da gangorra.

4 I RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Na Figura 7 se mostra o sistema em malha fechada considerando como saída o ângulo da gangorra θ.

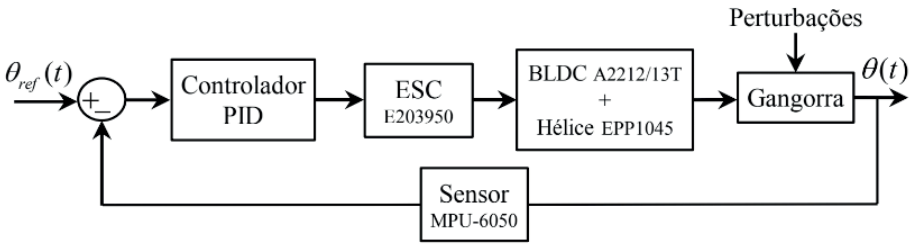


Figura 7 - Sistema em malha fechada

Fonte: Autoria própria

O coeficiente de empuxo dado em (3), pode ser estimado de maneira experimental. Para isto, se consideram os resultados experimentais dados em Paula, J. C. (2012), onde se relaciona o empuxo à velocidade e potência do motor. Assim, usando as relações dadas em (5) e (6) foram estimados os coeficientes C_T e C_Q de acordo com (3) e (4), respectivamente. Desta forma $C_T = 0.05933$ e $C_Q = 0.0088$.

O Matlab/Simulink possui a ferramenta PID *Autotuning* para a sintonia do controlador PID usando um modelo da planta. Com esta ferramenta é possível determinar os parâmetros do controlador ajustando tanto o comportamento transitório, quanto a estado estacionário do sistema em malha fechada. O ajuste obtido é útil como ponto de partida para depois refinar os parâmetros em tempo real, uma vez que o código do controlador é embarcado no microcontrolador de bordo no sistema real. Assim, foram obtidos os seguintes parâmetros de sintonia: $K_p = 0{,}10$, $K_i = 0{,}03$ e $K_d = 0{,}10$ onde $K_i = K_p/T_i$ e $K_d = K_p T_d$.

Uma vez sintonizado o controlador, se procede à validação via simulação do sistema controlado. Para isto, se consideram as situações seguintes: $\theta_{ref} = 0o$ e condição inicial de -27o, $\theta_{ref} = -10o$ e condição inicial de 0o. Como as simulações foram satisfatórias para a sintonia do controlador (ver Figura 8), seguiu-se para a implementação prática. Para um melhor funcionamento é realizado um ajuste fino experimental do controlador, chegando nos seguintes valores Kp = 0,3, Ki = 0,0018 e Kd = 0,4. A discrepância entre os parâmetros do controlador, obtidos via simulação e de forma experimental, pode-se dar já que o modelo do sistema é obtido de acordo com certas considerações feitas como, por exemplo, a ausência

do atrito no sistema, o que pode levar a que o sistema real apresente um comportamento não idêntico como o esperado via simulação.

Resultados de simulação e experimentação são apresentados na Figura 8. Se pode observar que a máxima amplitude das oscilações ocorre entorno dos 3º, com picos pontuais em determinados momentos devido às acelerações e desacelerações próprias do propulsor. No entanto, o comportamento do sistema se comparados com os simulação são bem semelhantes, tanto nas amplitudes, quanto no tempo de assentamento e o máximo de sobressinal. As maiores diferenças se devem, principalmente, nas oscilações do sistema real, devido a que as forças contrárias ao empuxo são baixas, pois o propulsor utilizado é capaz de erguer até 660 g e a gangorra apresenta um peso de aproximadamente 70 g. Portanto, por menor que seja o aumento da velocidade do propulsor acaba por gerar as oscilações observadas.

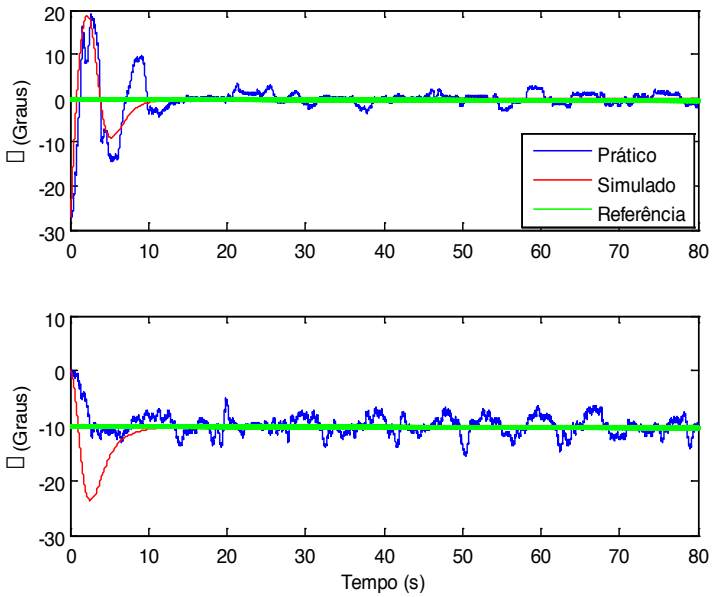


Figura 8 - Resultados de simulação e experimentação com referência.

Fonte: Autoria própria

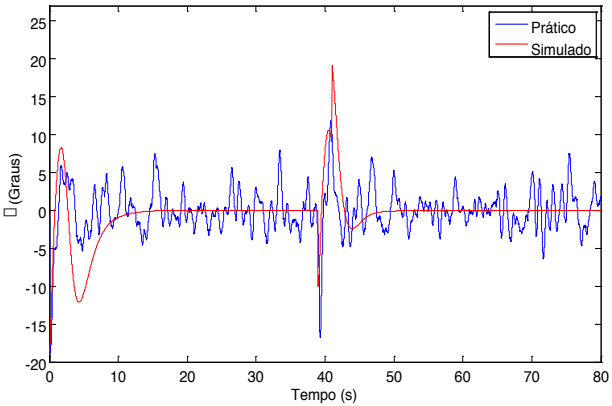


Figura 9 - Resultados de simulação e experimentação com perturbação.

Fonte: Autoria própria

A Figura 9 mostra os resultados para o sistema perturbado por meio da aplicação de uma força externa, manual, nos 40 s, considerando $\theta_{ref} = 0^o$ e condição inicial de -19º. Como se observa, o controlador teve uma boa rejeição à perturbação, a qual foi de -15º, sendo exagerada com o intuito de observar a robustez do controlador.

5 I CONCLUSÕES

Foi apresentada a modelagem, simulação e o controle PID de uma plataforma do tipo gangorra de eixo único com um único propulsor. A sintonia inicial do PID foi realizada usando o PID *Autotuning* do Matlab/Simulink, e depois os parâmetros do controlador foram refinados em base à resposta em tempo real do sistema. O controlador PID se mostrou robusto na rejeição à perturbação e com um bom desempenho na estabilização tanto no transitório, quanto a estado estacionário. Assim, o PID se mostra, ainda, como uma boa opção tanto no seguimento de trajetória quanto na rejeição a perturbações.

Desde uma perspectiva educacional, a plataforma pode ser usada na aprendizagem de assuntos interdisciplinares, como por exemplo, modelagem de sistemas dinâmicos, estudo do algoritmo de controle PID e suas variantes, além do projeto e implementação de outras técnicas de controle, como alocação de polos, IMC, controle por modo deslizante, linearização por realimentação, MPC e Fuzzy. Desta forma, os estudantes conseguirão visualizar de maneira prática temas relacionados à modelagem e controle de sistemas inerciais autônomos, especificamente os quadrirotores, os quais vêm-se mostrando de grande utilidade nas diversas áreas da sociedade atual.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, através do Programa de Iniciação Científica Voluntária (PIC) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

REFERÊNCIAS

Åström, K. J. and Hägglund, T. (1995**). PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society; 2nd Edition. United States of America.

Ben Moussa Sellali B. and Allali A. (2017). **Neuro — Fuzzy methods coupled to operational PID, to improve the flight parameters of a drone**. 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 314-319. Monastir.

Barnes, W. M. (1995). **Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics**. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New-York.

Erol U., Turgay A., Onur K., Lutfi M. (2012). **Position Control of a Seesaw like Platform by Using a Thrust Propeller. The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control**. March 25-27, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

Goodarzi F., Lee D. e Lee T. (2014). **Geometric stabilization of a quadrotor uav with a payload connected by flexible cable**. American Control Conference (ACC), 4925–4930. Portland.

Gomes, L. L., Leal L., Oliveira T. R., S. da Cunha J. P. V. S. (2014). **Controle de um veículo quadrirrotor usando um sistema de captura de movimentos**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, 1474- 1481. Belo Horizonte, MG, Brasil.

Kim, J., Roh, M., Song, J., Song, W., Kang, B., and Kim, J. (2012). **An Experimental Study of a Single Axis Seesaw Attitude Control Consisting of Motor and Propeller**. The Journal of Advanced Navigation Technology, 16 (1), 1–7.

Luna T. L., Sanca A. S., Alsina P. J., Medeiros A. D., Guimarães J. P. F. (2011). **Posicionamento de um veículo aéreo não tripulado para detecção de corrosões**. Petro & Quimica, 34 -38. Brasil.

Mohamed A. M. A. and AbuElgasim A. E. (2019). **Controlling Drone–using IOT platform**. International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 1-4. Khartoum, Sudan.

Mohammad H. and Md. Nadim B. W. (2019). **Seesaw Dynamics and Control-Experimental Study**. Journal of Mechanical Robotics, 4(2), 1-7.

Nils G., Atheel R. and Sergio M. (2012). **Avionic control systems for education and development**. Proceedings of INTED2012 Conference. 5th-7th March 2012, Valencia, Spain.

Ogata, K. (2010). **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição. Pearson Education do Brasil, São Paulo.

Oguntoyinbo, O. J. (2009). **PID Control of Brushless DC Motor and Robot Trajectory Panning and Simulation with MATLAB/SUMULINK**. Degree Programme of Information Technology, Vaasan Ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences, Finland.

Paula, J. C. (2012). **Desenvolvimento de um VANT do tipo quadrirrotor para obtenção de imagens aéreas em alta definição**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Shukla A., Xiaoqian H. and Karki H. (2016). **Autonomous tracking of oil and gas pipelines by an unmanned aerial vehicle**. *IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 1-4. Abu Dhabi.*

Shakhatreh H., Sawalmeh A. H., Al-fuqaha A.,Dou Z., Almaita E., Khalil I., Othman N. S., Khreishah A., and Guizani M. (2019). **Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges**. In *IEEE Access*, 7, 48572-48634.

Santana, L. V., Filho, M. S., Carelli, R. (2012). **Modelagem e controle não linear subatuado de um quad-rotor: Parte 1**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012), 449-454. Campina Grande, Brasil.

Takahashi K., Fujimoto H., Hori Y., Kobayashi H. and Nishizawa A. (2014). **Modeling of propeller electric airplane and thrust control using advantage of electric motor**. IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), 482-487. Yokohama.

Wang B., Chen X., Wang Q., Liu L., Zhang H. and Li B. (2010). **Power line inspection with a flying robot**. *1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry.* Montreal, QC, Canada.

CAPÍTULO 23

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 29/01/2021

Paulo Vinícius de Souza Oliveira
Universidade Federal Rural do Semiárido
Mossoró – Rio Grande do Norte (RN)
http://lattes.cnpq.br/1462887960073090

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra
Universidade Federal Rural do Semiárido
Mossoró – Rio Grande do Norte (RN)
http://lattes.cnpq.br/2711699996455302

Luiz José de Bessa Neto
Universidade Federal Rural do Semiárido
Mossoró – Rio Grande do Norte (RN)
http://lattes.cnpq.br/7789507016133689

Vitória Caroline Carvalho do Nascimento
Universidade Federal Rural do Semiárido
Mossoró – Rio Grande do Norte (RN)
http://lattes.cnpq.br/3121122875465500

RESUMO: Com a escassez de água se tornando um problema cada vez mais crônico ao redor do mundo, surge a necessidade de produzir água através de processos de dessalinização. A dessalinização ou destilação solar, caracteriza-se por ser um processo simples e barato, utilizando a energia proveniente do sol para produzir água de boa qualidade. Dessa forma, o presente trabalho tem como proposta projetar e construir um destilador solar portátil de cobertura piramidal que reúna eficiência e portabilidade, para ser utilizado em locais que tem dificuldade de acesso à água potável, como nas zonas rurais do Rio Grande do Norte. Para fins de estudo e verificação do funcionamento do equipamento, foram realizados ensaios onde foram medidos parâmetros em diferentes locais do protótipo. Ao fim dos ensaios, analisou-se o comportamento do destilador solar através dos indicadores medidos, onde este apresentou um bom comportamento, alcançando uma eficiência superior a 20%.
PALAVRAS - CHAVE: Destilação solar, Energia Solar, Água Salobra.

PORTABLE SOLAR DESALINATION SYSTEM FOR APPLICATION IN RURAL COMMUNITIES IN RIO GRANDE DO NORTE

ABSTRACT: Water scarcity become an increasingly chronic problem around the world, there is a need to produce water through desalination processes. Desalination or solar distillation is a simple and inexpensive process using the energy from the sun to produce good quality water. Thus, the present work aims to design and build a portable pyramidal solar distiller that combines efficiency and portability, to be used in places that have difficulty accessing drinking water, such as in rural areas of Rio Grande do Norte. For purposes of study and verification of the equipment operation, tests were performed where parameters were measured at different locations of the prototype. At the end of the tests, the behavior of the solar distiller was analyzed through the measured indicators, where it presented well, reaching an efficiency above 20%.

KEYWORDS: Solar Distillation, Solar Energy, Brackish Water.

1 | INTRODUÇÃO

A água se tornou um bem cada vez mais precioso, devido à sua crescente escassez. O clima semiárido que compõe a maior parte do Rio Grande do Norte (RN), apresenta ausência de chuvas em grande parte do ano (MARINHO, 2012). Em função da dificuldade de muitas famílias terem acesso ao recurso de qualidade, soluções como produzir água potável através de água do mar e de água salobra, vem ganhando cada vez mais espaço.

Dentre as tecnologias para a produção de água potável, segundo Faria *et al*. (2015), a destilação solar surge como uma solução atraente, visto que é sustentável, não gera poluentes, é de fácil manuseio e de baixo custo. O destilador solar apresenta funcionamento semelhante ao ciclo natural da água, de forma que a energia solar evapora a água salgada ou salobra que fica depositada no equipamento, condensando-a posteriormente em água potável para consumo humano, apresentando alto grau de pureza (FARIA *et al*., 2015).

Por todo o exposto, o presente artigo tem como objetivo confeccionar um destilador solar visando auxiliar a qualidade de vida da população que reside em áreas rurais, e tem como foco a portabilidade deste protótipo, pois agrega a possibilidade de transportar o sistema para diferentes lugares em comunidades rurais do RN.

2 | DESTILAÇÃO SOLAR

Segundo Soares (2004), a destilação solar pode ser definida basicamente como o processo onde, através do aquecimento da água salobra ou salgada pelos raios solares, ocorre a produção de vapor d'água que é condensado em uma superfície e coletado como água purificada. No destilador solar, a radiação atravessa o vidro aquecendo a água salobra, fazendo com que ela evapore, o vapor sobe e é condensado na parte interna do teto de vidro do destilador, onde escorre até ser coletado nas canaletas (SÁ, 2012).

Os destiladores solares podem ser classificados em duas categorias, os sistemas ativos e passivos. Nos sistemas ativos, além do aproveitamento da radiação solar, é aplicada uma parcela extra de energia ao destilador, buscando acelerar o processo de evaporação (JORGE, 2011). Essa energia extra provém de equipamentos externos, como o coletor solar plano, por exemplo, sendo esse tipo de sistema mais utilizado para escala comercial devido à sua maior eficiência (TEXEIRA, 2013).

Segundo Teixeira (2013), os sistemas passivos não utilizam fonte extra, utilizando apenas a energia do sol para evaporar a água, o que torna o processo mais lento, porém menos dispendioso, sendo assim economicamente viável para o fornecimento de água potável. Esse tipo de sistema será o foco deste trabalho e por isso será estudado com mais detalhes.

2.1 Destilador solar com cobertura piramidal

O destilador solar com cobertura piramidal é caracterizado por possuir a possibilidade de captar a energia solar através de quatro faces, o que possibilita a absorção da radiação por todos os lados, trazendo versatilidade ao equipamento, visto que ele não sofrerá perda de eficiência devido ao posicionamento do sol (RIBEIRO *et al.*, 2008). O funcionamento do referido destilador é semelhante ao do tipo convencional, pois a água salobra fica armazenada em uma bacia retangular no interior do equipamento, onde a radiação solar aquece e evapora a água, condensando-a no teto piramidal que possui uma angulação pré-definida, que facilita o escoamento da água destilada para o reservatório final.

2.2 Eficiência da destilação solar

A eficiência de um destilador solar relaciona-se à sua capacidade de aproveitar a energia inserida sobre o sistema para realizar o processo de destilação da água salobra. Essa eficiência é um fator dependente de diversos fatores, como os materiais utilizados, as dimensões, a localização geográfica, regime de ventos, etc. De toda a energia que incide sobre o destilador solar, apenas de 38% a 43% são utilizados no processo de evaporação da água salobra, limitando assim a eficiência do sistema (SILVEIRA, 2014). Com isso, um projeto bem elaborado juntamente com um local adequado são fundamentais para que o sistema de dessalinização solar apresente bons índices de eficiência.

3 I MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Construção do destilador solar

Os materiais utilizados na construção foram escolhidos visando o maior custo-benefício, além de garantir uma boa isolação, resistência à temperatura e durabilidade. Os ensaios foram realizados no entorno do prédio de Engenharias I da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Campus Leste, na cidade de Mossoró/RN.

3.1.1 Tanque

O tanque do destilador solar foi construído de vidro comum de 4 mm de espessura, cuja vedação foi realizada com silicone. O reservatório possui formato de base quadrada, com 0,0576 m², altura de 10 cm, totalizando 0,00576 m³, dessa forma o tanque tem capacidade de suportar até 5,76 litros de água salobra. A Fig. 1 apresenta o reservatório do destilador construído.

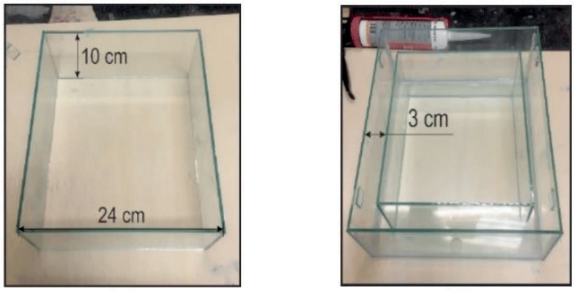


Figura 1: Reservatório: (a) Individualmente (b) Inserido no destilador (Oliveira, 2018).

3.1.2 Cobertura

Foi utilizado em sua construção vidro comum de 4 mm de espessura. Para a estrutura de cobertura do tipo piramidal optou-se por utilizar o ângulo de 25°, que, segundo Soares (2004), permite atingir maior otimização do projeto. Sua construção ocorre a partir de quatro módulos em formato triangular. A base da pirâmide é quadrada, logo, cada módulo deve ter o comprimento equivalente a um lado do quadrado, sendo esse valor de 33 cm. Para uma angulação de 25º e base de 30 cm, o valor calculado da altura de cada triângulo foi de 16,8 cm. Após o projeto, foi construída a cobertura piramidal, apresentada na Fig. 2.

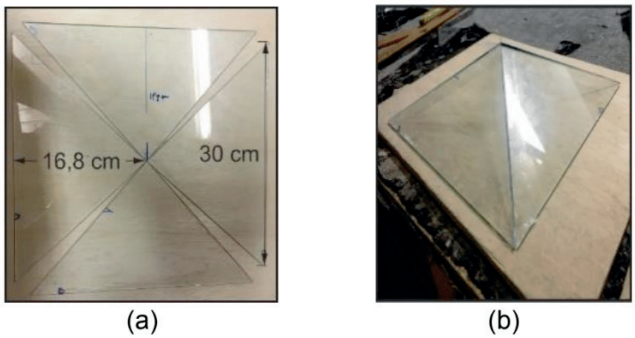


Figura 2: Cobertura piramidal: (a) Módulos (b) Estrutura construída (Oliveira, 2018).

3.1.3 Isolação térmica

A isolação térmica tem como função conter o máximo de energia térmica dentro do reservatório, evitando perdas para o ambiente externo. O principal componente utilizado na isolação foi o isopor de 6 mm de espessura, que foi pintado de preto, com o objetivo de absorver o máximo possível da radiação solar incidente, e foi colocado em camadas, onde entre as camadas foi inserido o papel alumínio, que foi utilizado como material refletor,

tendo a função de evitar perdas por radiação. A Fig. 3 expõe o sistema de isolação térmica construído.

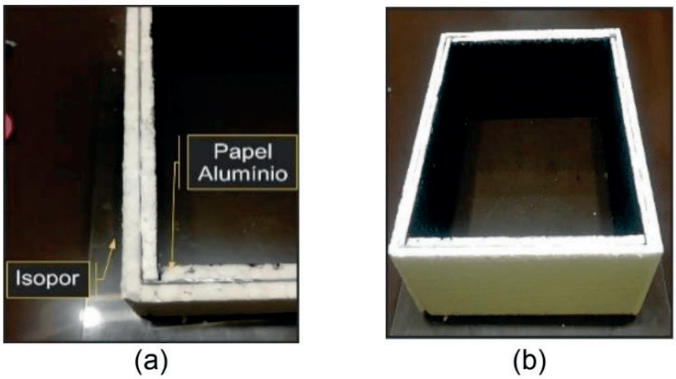


Fig. 3: Sistema de isolação: (a) Detalhe das camadas (b) Isolação Construída (Oliveira, 2018).

3.1.4 Revestimento

O revestimento do reservatório tem como objetivo manter a água salobra isolada, além de contribuir com a isolação térmica. O material utilizado foi lona preta própria para estufas, que foi inserida cobrindo o interior do tanque onde contém a isolação térmica. Ao fim do processo, a área útil do reservatório foi de 0,042 m², com uma altura útil de 9 cm, totalizando 0,00378 m³, desse modo o destilador tem a capacidade de inserção de 3,78 litros de água salobra.

3.1.5 Sistema de escoamento

O sistema de escoamento ocorre a partir do processo de condensação da água limpa, que escorre pela cobertura piramidal e é gotejada no recipiente de coleta onde fica armazenada. O recipiente apresenta área de 0,033 m² e altura de 10 cm, totalizando 0,0033 m³, tendo assim uma capacidade de 3,3 litros de água destilada. O produto final pode ser coletado através de uma torneira. A Fig. 4 expõe o sistema de escoamento do destilador solar piramidal.

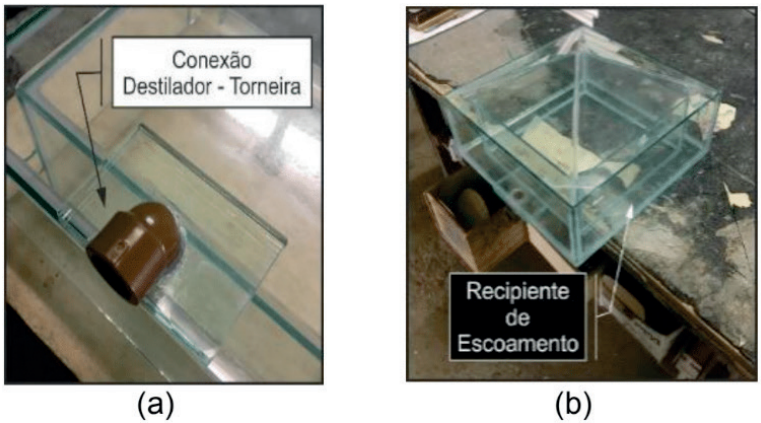


Figura 4: Sistema de escoamento: (a) Detalhe da conexão (b) Recipiente de escoamento (Oliveira, 2018).

3.2 Protótipo do destilador solar

Um dos problemas enfrentados por destiladores solares é o difícil processo de higienização. A falta de limpeza periódica no reservatório faz com que uma quantidade elevada de sais se deposite no fundo do tanque de água salobra, diminuindo a eficiência do sistema (RIBEIRO *et al*., 2008). Visando a possibilidade de limpeza do tanque e do sistema como um todo, foi adicionada à cobertura piramidal um sistema de encaixe no destilador, onde, através de dois suportes, o usuário pode retirar a tampa e inserir novamente água salobra e/ou realizar a limpeza do equipamento.

Outro componente adicionado ao projeto final foi o suporte do destilador, que tem como função evitar o contato do sistema com a superfície, prevenindo possíveis danos externos. O suporte foi construído utilizando quatro “apoios” de madeira de boa qualidade, onde os “apoios” posteriores possuem 8,5 cm de altura e os frontais 8 cm, o que possibilita uma inclinação que facilita o escoamento da água destilada. A Fig. 5 apresenta o destilador solar construído.

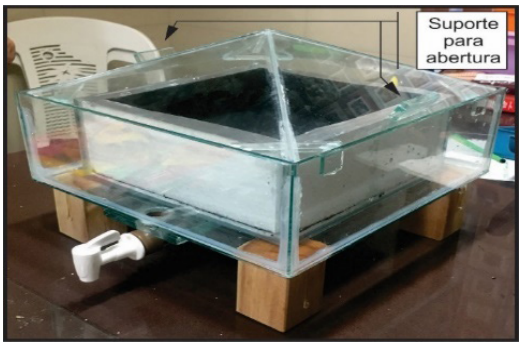


Figura 5: Destilador solar construído (Oliveira, 2018).

3.3 Metodologia dos ensaios e procedimento de coleta de dados

Para testar o funcionamento do destilador solar, foram realizados ensaios durante o período de 14 a 23 de agosto de 2018, sempre utilizando um litro de água salobra doada pelo setor de piscicultura da UFERSA, em que foram medidos os parâmetros: temperatura do ambiente, temperatura na superfície da cobertura, temperatura do vapor de água, temperatura da água salobra, temperatura da água destilada e a radiação solar; a cada uma hora, das 8:00 h às 14:00 h.

Para medir cada parâmetro, foram utilizados termopares ligados a um alicate amperímetro na função termômetro, um anemômetro, um termômetro a *laser*, um termômetro digital e um medidor de radiação solar. Os equipamentos foram cedidos pelo Laboratório de Engenharia Elétrica e Mecânica da UFERSA.

Os experimentos ocorreram ao longo de oito dias, sempre com pleno sol e pouca nebulosidade, no entanto, dos oito dias, sete foram dedicados para analisar o sistema, identificar os erros e repará-los. Logo, o último dia de ensaios foi considerado nesta análise, pois os ensaios realizados tinham como finalidade validar o protótipo desenvolvido.

O procedimento para coletar os dados se iniciou medindo a temperatura do ambiente, com a utilização do anemômetro na função temperatura; em seguida foi medida a radiação solar, com o auxílio do medidor de radiação solar; posteriormente foi medida a temperatura na superfície da cobertura, utilizando o termômetro a *laser*; na sequência foi medida a temperatura do vapor de água, com o termômetro digital; e, por último, foram realizadas as medições da temperatura das águas salobra e destilada, ambas com o alicate amperímetro utilizando a função termômetro.

3.4 Eficiência

A eficiência de um destilador solar é um parâmetro importante, pois analisa a relação entre a produção de água destilada por um determinado período de tempo e a quantidade de energia solar que o equipamento recebe. Através da Eq. 1 é possível verificar a eficiência do sistema.

$$\eta = \frac{Q \cdot 2{,}3}{G \cdot A} \qquad (01)$$

Onde η é a eficiência do sistema, Q a quantidade de água destilada ao fim de um dia de coleta (L/dia), G a média diária da energia acumulada total (MJ/m²) e A a área útil do destilador (m²).

4 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise do protótipo construído

Os primeiros dias do período de ensaio foram utilizados para avaliar o comportamento do destilador durante as horas em que foi exposto ao sol. Observou-se que todos os materiais se comportaram de modo satisfatório, suportando as temperaturas às quais foram submetidos. No entanto, foi observado que embora a temperatura da água salobra aumentasse de forma gradativa e satisfatória, o sistema não apresentava uma condensação suficiente na cobertura para produzir água destilada, tornando-o ineficaz.

Após propor algumas soluções que não surtiram efeito no comportamento do sistema, observou-se que, embora aparentemente o sistema de encaixe entre a cobertura piramidal e o destilador solar estivesse totalmente acoplado, existiam pequenas fendas entre eles. Essa falha possivelmente foi causada devido ao corte manual do vidro. Tais espaços fizeram com que o vapor de água formado dentro do destilador fosse perdido para o ambiente externo, dificultando a condensação na cobertura.

A solução encontrada foi vedar o sistema de encaixe com fita adesiva. Tal medida se mostrou satisfatória, visto que o nível de condensação melhorou significativamente, o que tornou possível a geração de água destilada. A Fig. 6 apresenta um comparativo do sistema com e sem a vedação, ou seja, com e sem o reparo, respectivamente.

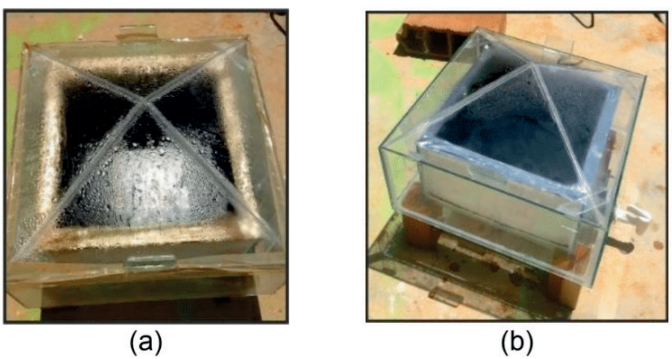


Figura 6: Destilador solar: (a) Com a vedação (b) Sem a vedação (Oliveira, 2018).

Outro problema identificado foi a temperatura elevada nas superfícies laterais do destilador, de modo que a água destilada evaporava ao chegar no reservatório de escoamento. A solução foi revestir as laterais com um material isolante térmico (papelão). Com todos os problemas resolvidos, o destilador solar funcionou como esperado, sendo possível realizar as análises. A Fig. 7 apresenta o destilador após a realização dos reparos mencionados.



Figura 7: Destilador solar ajustado (Oliveira, 2018).

O custo total do protótipo foi de cerca de R$ 80,00, sendo 80% do custo total respectivo ao vidro e ao silicone, uma vez que o vidro compõe basicamente todo o destilador, e junto a ele é necessário o silicone, onde foi utilizado o de melhor qualidade, a fim de evitar vazamentos e futuros gastos com reparos.

4.2 Estudo dos parâmetros

4.2.1 Temperatura do ambiente e temperatura na superfície da cobertura

A Fig. 8 exibe os valores da temperatura do ambiente no dia do ensaio, ou seja, no dia 23/08/2018, sendo essa medição feita próxima ao destilador solar.

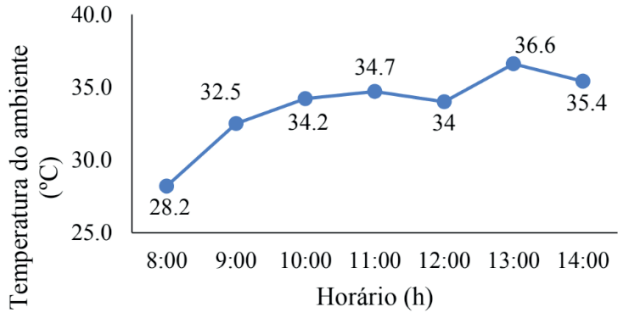


Figura 8: Gráfico de temperatura do ambiente durante o dia de ensaio (Oliveira, 2018).

Com o estudo dos valores obtidos através da medição, percebeu-se que durante o ensaio (*vide* Fig.8) a temperatura do ambiente estava favorável ao experimento, apresentando valores acima da média de 31 ºC da região nordeste. Outro fato observado foi que não houve alterações bruscas de temperatura ao longo do dia, obtendo-se ao final uma temperatura média de 33,66 ºC.

Os valores de temperatura medidos na superfície da cobertura podem ser observados na Fig. 9, onde é possível verificar o aumento gradativo da temperatura. Como não se trata de um material ideal, essa crescente é natural visto que o vidro absorve parte da energia recebida pela radiação solar, elevando sua temperatura. Além disso, as temperaturas atingidas na cobertura foram consideradas altas, obtendo-se uma média de 44,37 ºC, o que é satisfatório, pois comprova a eficiência do sistema em captar a energia solar.

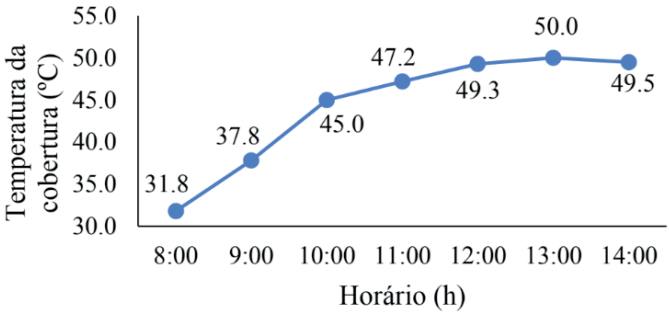


Figura 9: Gráfico de temperatura da cobertura piramidal durante o dia de ensaio (Oliveira, 2018).

4.2.2 Radiação solar

A radiação solar é um parâmetro de fundamental importância para o sistema, visto que é o fator que provoca a evaporação da água salobra, dando início ao processo de

destilação. A Fig. 10 apresenta os valores de radiação solar durante o dia de ensaio.

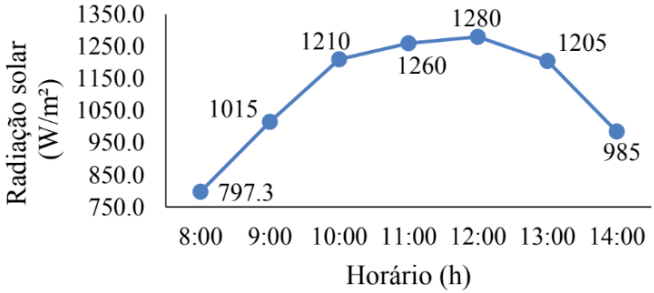


Figura 10: Gráfico de radiação solar incidente no destilador no dia de ensaio (Oliveira, 2018).

Através da Fig. 10, é possível verificar que os índices de radiação aos quais o sistema foi exposto foram satisfatórios, se comportando de maneira crescente até as 12:00 h, porém sem atingir níveis muito elevados. Após o pico do meio-dia houve uma queda ao passar das horas, o que é natural, no entanto, os valores ainda foram aceitáveis, contribuindo para o funcionamento do sistema. Ao fim da coleta de dados, obteve-se uma radiação média de 1.107,47 W/m².

4.2.3 Temperatura do vapor de água, temperatura da água salobra e temperatura da água destilada

A temperatura do vapor de água dentro do destilador solar está diretamente ligada à sua eficiência, visto que o sistema deve resguardar o máximo de energia, elevando a temperatura em seu interior e, consequentemente, do vapor de água. A Fig. 11 exibe os valores de temperatura do vapor de água no interior do destilador.

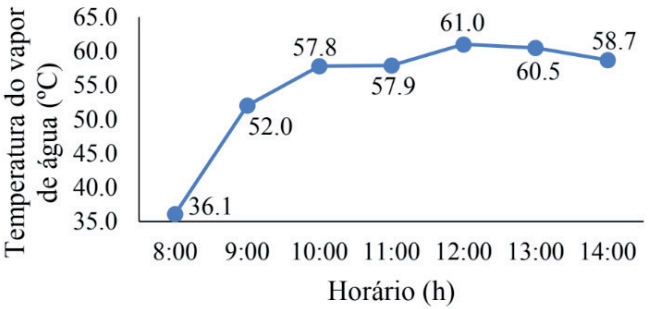


Figura 11: Gráfico de temperatura do vapor de água durante o dia de ensaio (Oliveira, 2018).

A partir dos valores mostrados na Fig. 11, foi possível analisar que o sistema conseguiu absorver e conservar a energia que incidiu sobre ele, pois a temperatura do vapor de água se manteve crescente acompanhando os níveis de radiação, chegando ao pico de 61 ºC. Após o pico, não existiu queda acentuada de temperatura, comprovando que o equipamento conseguiu conservar o máximo de energia em seu interior. Ao final do dia de ensaio, a temperatura média do vapor de água foi de 54,86 ºC, sendo um valor satisfatório.

A Fig. 12 apresenta os valores de temperatura da água salobra durante o dia de ensaio, o estudo desse parâmetro é importante, pois relaciona a radiação solar incidente sobre o destilador com a capacidade do sistema de direcionar e conservar essa energia para o aquecimento da água salobra.

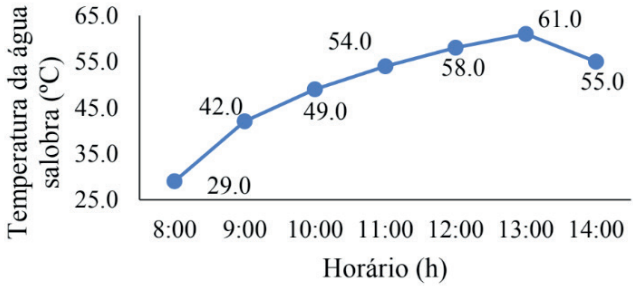


Figura 12: Gráfico de temperatura da água salobra durante o dia de ensaio (Oliveira, 2018).

Ao analisar a Fig. 12, percebeu-se que o comportamento do sistema foi satisfatório, pois a temperatura da água salobra elevou-se até às 13:00 h, chegando ao ápice de 61 ºC, decaindo somente na última hora de medição, pois houve uma queda da radiação solar incidente em 18,26%. Ao fim do período de análise obteve-se uma temperatura média de 49,71 ºC.

A análise do comportamento da temperatura da água destilada é importante, pois mostra se o sistema é capaz de conservar a água destilada, de maneira que ela não evapore novamente e seja perdida. A Fig. 13 mostra o comportamento da temperatura da água destilada no dia do experimento.

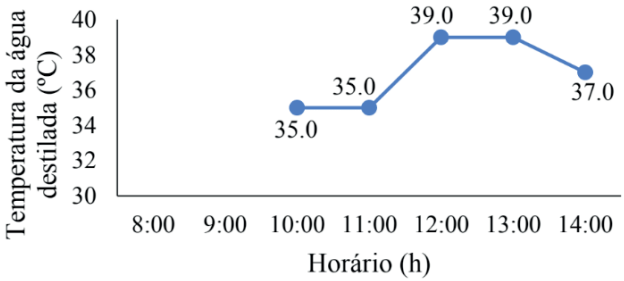


Figura 13: Gráfico de temperatura da água destilada durante o dia de ensaio (Oliveira, 2018).

Como a produção de água destilada somente foi iniciada após às 9:00 h, a medição iniciou-se às 10:00 h. Analisando os valores obtidos, é perceptível que a temperatura da água destilada é inferior à da água salobra, comprovando a eficácia do destilador solar. A temperatura média, considerando somente os horários de 10 h às 14 h, obtida foi de 37 ºC, sendo 12,71 ºC abaixo da média da temperatura da água salobra.

4.3 Eficiência

A eficiência do destilador solar pode ser calculada a partir da Eq. 1 apresentada na metodologia (seção 3.4). A quantidade de água destilada obtida ao fim do dia de ensaio (Q) foi de 100 mL ou 0,1 L. Com relação à energia acumulada média (G), foi obtido o valor de 1.107,47 W/m² durante 6 horas de exposição, o equivalente a 23,92 MJ/m². E, por último, a área eficaz ocupada pelo destilador solar (A) foi de 0,042 m². A partir da aplicação dos valores obtidos na Eq. 1, o destilador solar apresentou uma eficiência () de 22,89%.

A fim de analisar a eficiência alcançada no experimento, este foi comparado com destiladores solares desenvolvidos por outros autores. Analisou-se a eficiência do destilador solar desenvolvido por Faria (2015), que também possui cobertura piramidal com área útil de 0,2025 m² e foi submetido a 17 dias de análise nos meses de abril e junho, em Conceição das Alagoas/MG, onde os valores obtidos de eficiência variaram de 15,2% a 56,5%. Outro projeto tomado como base também foi construído na UFERSA, campus Mossoró. O destilador solar desenvolvido por Silveira (2014), possui cobertura de duas águas com 1 m² de área útil, sendo submetido a dois dias de testes durante o mês de fevereiro, onde as eficiências encontradas foram entre 20% e 21%.

Comparando a eficiência determinada neste trabalho com as obtidas nos modelos citados, é possível verificar que o valor de 22,89% se encontra dentro de uma faixa aceitável de eficiência, tornando o sistema viável, especialmente quando comparado ao trabalho desenvolvido por Silveira (2014), pois também foi realizado na cidade de Mossoró, ou seja, no mesmo clima e ambiente, modificando os materiais utilizados e a cobertura do destilador solar.

5 | CONCLUSÃO

Os elevados índices de radiação solar de Mossoró foram essenciais para o bom funcionamento do destilador solar proposto, onde foram obtidos resultados satisfatórios. Os materiais utilizados foram selecionados visando o melhor desempenho e eficiência, garantindo que o sistema não apresentasse problemas com vazamentos ou de outra natureza. Quanto aos problemas enfrentados nos ensaios iniciais, todos foram solucionados de forma prática e eficiente, permitindo o funcionamento adequado do destilador durante o experimento final, ocorrido no dia 23/08/2018, validando o protótipo desenvolvido.

O sistema de destilação solar proposto apresentou uma eficiência de 22,89% e, quando comparado a outros trabalhos da área, observou-se que essa é uma faixa de eficiência positiva, devido à grande quantidade de perdas naturais do sistema e a este modelo possuir dimensões menores em função da sua característica portátil. Sugere-se para futuros trabalhos que o sistema seja ensaiado novamente sob as mesmas circunstâncias, onde a água destilada obtida seja submetida a ensaios visando classificar todos os parâmetros necessários para verificação da sua potabilidade.

Por fim, o destilador solar portátil de cobertura piramidal desenvolvido apresenta a união dos fatores portabilidade, praticidade de limpeza e manutenção, materiais de boa qualidade e uma eficiência satisfatória. Podendo ser utilizado por toda região do interior potiguar, permitindo o acesso à água de qualidade e melhor qualidade de vida aos usuários.

REFERÊNCIAS

FARIA, E. V. *et al.* **Desenvolvimento e construção de um destilador solar para dessalinização de água salgada em diferentes concentrações de sais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2015, São Carlos. Anais... . São Carlos: Enemp, 2015.

JORGE, Bruno Miguel Jacinto. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada.** 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143168489/Tese.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2018.

MARINHO, Francisco José Loureiro et al. **Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar.** Revista Brasileira de Agroecologia, Campina Grande, 2012.

OLIVEIRA, Paulo Vinícius de Souza. **Desenvolvimento de um destilador solar portátil com aplicação em comunidades rurais no Rio Grande do Norte.** 2018. TCC (Graduação) – Engenharia Elétrica, UFERSA, Mossoró, 2018.

RIBEIRO, Santos *et al*. **Destilador solar de cobertura piramidal e isolamento em. material compósito a base de gesso e eps.** in: Congreso Iberoamericano, 2008, Natal. Anais... . Galicia: M.vázquez, 2008. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2754664>. Acesso em: 24 ago. 2018.

SÁ, Lidiane Freire de; JUCÁ, José Fernando Thomé; MOTTA SOBRINHO, Maurício A. da. **Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar.** Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Taubaté. 2012. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92823615016>. Acesso em: 21 ago. 2018.

SILVEIRA, Maria Teresa Targino Macedo. **Análise da aplicabilidade e desempenho térmico de um destilador solar em Mossoró-RN**. 2014. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, UFERSA, Mossoró, 2014.

SOARES, Clarissa. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilziando água salgada, salobra e doce contaminada.** 2004. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2004.

TEXEIRA, Joaquim Lopes. **Dimensionamento e análise térmica de um dessanilizador solar tipo bacia com cobertura assimétrica.** 2013. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

CAPÍTULO 24

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

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 05/02/2021

Matheus Silva Pestana
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/5711361444291978

Danúbia Soares Pires
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/4739495583287970

Orlando Donato Rocha Filho
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão
São Luís – Maranhão
http://lattes.cnpq.br/7455720877184126

RESUMO: A Aprendizagem Ativa se caracteriza como uma técnica de ensino-aprendizagem voltada para a solução de problemas próximos do real ou simulados por especialistas de cada área de conhecimento, com temas multidisciplinares. Além disso, quando comparada a técnicas tradicionais de ensino, sua eficácia pode ser até duas vezes maior. Diante disso, o uso de métodos de ensino aprendizagem em salas de aula de faculdades, centros de ensino e de pesquisa nas áreas de engenharia, economia, administração, tecnologia da informação e medicina se difundiu pelo mundo. Como as ferramentas usadas por engenheiros e estudantes são de natureza numérica, isto é, são apresentados dados de entrada, iterados por plataformas em curtos intervalos de tempo e o resultado é apresentado por uma função de dados de saída versus tempo. Tais resultados não ajudam os usuários a entender a natureza dos circuitos lineares, pois não é contemplado o passo a passo da resolução dos circuitos, de acordo com os teoremas e métodos observados na literatura. Nesse sentido, foi construída uma plataforma didática para permitir a simulação passo a passo dos circuitos elétricos, utilizando software de modelagem e simulação para aprimorar o processo didático da disciplina de circuitos elétricos. Os resultados sobre o uso dessa plataforma didática por estudantes de engenharia mostram a eficiência, uma vez que é permitido observar todas as etapas da solução de circuitos elétricos.

PALAVRAS - CHAVE: Circuitos Elétricos Aplicados; Simulação Didática; Plataforma Computacional; Aprendizagem Ativa; Simulação.

IMPLEMENTATION OF A COMPUTATIONAL DIDACTIC PLATFORM APPLIED TO ELECTRICAL CIRCUITS ANALYSIS IN AN OPEN SOURCE ENVIRONMENT - SCIENTIFIC LABORATORY (SCILAB)

ABSTRACT: Active Learning is characterized as a teaching-learning technique aimed at solving problems close to the real thing or simulated by specialists in each area of knowledge, with multidisciplinary themes. In addition, when compared to traditional teaching techniques, its effectiveness can be up to twice as effective.

In view of this, its use of teaching and learning methods in college classrooms, teaching and research centers in the area of engineering, economics, administration, information technology and medicine has spread throughout the world. As the tools used by engineers and students are numerical in nature, i.e., input data is presented, iterated by platforms at short intervals of time, and its result is presented by an output data function versus time. Such results do not help users to understand the nature of linear circuits, as the resolution of circuits is not contemplated step by step, according to the theorems and methods observed in the literature. In this sense, a didactic platform was built to allow the step-by-step simulation of electrical circuits, using modeling and simulation software to improve the didactic process of the electrical circuit discipline. The results on the use of this didactic platform by engineering students show the efficiency, since it is allowed to observe all the steps of the electric circuits solution.
KEYWORDS: Applied Electrical Circuits; Didactic simulation; Computational platform; Active Learning; Simulation.

1 | INTRODUÇÃO

A educação superior brasileira tem passado por uma série de adaptações e transformações, com o objetivo bem específico de promover uma formação acadêmica voltada para o desenvolvimento de experiência colaborativa, metodologias on-line e ensino diferenciado, em especial, na educação 4.0, (GABRIEL, 2017). Esses pilares propiciam ao estudante autonomia e elaboração de conhecimento durante o processo de ensino com a resolução de problemas típicos de suas atividades acadêmicas, fazendo com que o papel dos alunos não seja mais passivo, mas ativo no processo de ensino-aprendizagem, se envolvendo em atividades cada vez mais complexas, possibilitando a tomada de decisões e avaliação de resultados (NAN, 2019).

A Aprendizagem Ativa se caracteriza como uma técnica de ensino-aprendizagem voltada para a solução de problemas próximos do real ou simulados por especialistas de cada área de conhecimento, com temas multidisciplinares. A Aprendizagem Baseada em Problemas ou *Problem Based Learning* é desenvolvida em universidades americanas, tais como, *MIT*, *Harvard* e *Stanford*, nas quais as relações de sala de aula foram repensadas, adotando uma abordagem pedagógica voltada para a solução de problemas, possibilitando aos estudantes aquisição de conhecimento de forma ampliada, minimizando a ocorrência de uma educação fragmentada (Farias, 2015). Com essa abordagem, os estudantes desenvolvem o processamento cognitivo e os conhecimentos prévios são somados às reflexões críticas feitas diante dos problemas propostos. A Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, Ministério (BRASIL, 2018) incentiva a utilização de técnicas de Aprendizagem Ativa, a fim de desenvolver competências e habilidades na formação dos estudantes, de forma geral, beneficiando o pensamento crítico, a instrução de atividades, engajamento e comprometimento. Além disso, metodologias de Aprendizagem Ativa representam uma eficácia duas vezes maior quando comparadas ao modelo de aula

tradicional, tais métodos de Aprendizagem Ativa e Aprendizagem Baseada em Problemas são aplicados em diversas áreas de conhecimento, como engenharias, administração, tecnologia da informação, medicina, ciência política e negócios, (KAZERUNI, 2018). O uso de software no ambiente acadêmico permite a construção de conhecimentos em larga escala, promovendo maior interação entre os alunos e os materiais publicados em sala de aula, livros e materiais didáticos. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo facilitar o processo de ensino-aprendizagem de alunos durante a disciplina de Circuitos Elétricos, reduzindo as dificuldades dos discentes na análise e compreensão na resolução de problemas propostos. Seu desenvolvimento em plataforma de código aberto facilita a sua utilização e aplicabilidade em centros educacionais, faculdades e universidades, reduzindo a complexidade da disciplina e aumentando a capacidade de trabalho multidisciplinar.

Neste contexto, o uso desses recursos é apresentado como uma alternativa viável para reduzir as dificuldades de compreensão, aumentar a assimilação de conceitos e melhorar a interação entre os alunos e as ferramentas computacionais.

2 | DEFINIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Em uma pesquisa na página do *Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE*, com a palavra-chave *"Circuitos Elétricos"*, observa-se um amplo uso do termo em pesquisas realizadas nos anos de 2010 a 2020. Até o ano de 2020, houveram em torno de 133.109 publicações, incluindo artigos de congressos e revistas especializadas, entre os quais, pode-se citar: em (KULGINA, 2019), foi desenvolvido um módulo amigável que pode facilitar a análise dos circuitos elétricos utilizando softwares fechados, a fim de ajudar os alunos a entender os cálculos realizados durante a solução de problemas propostos; em (SHAPOVALOV, 2019), foi apresentado o modo de formação do sistema de equações diferenciais, que descreve um circuito linear com indutâncias variáveis pelo método de tensões nodais; em (SADIKU, 2013), foi descrito uma formulação sistemática para os Teoremas de *Kirchhoff* para a tensão e a corrente, tais conhecimentos podem ser úteis em sistemas de proteção; em (ZEGGAI, 2019) foi observada que a análise de curto-circuito fornece as informações necessárias para determinar se as capacidades de interrupção dos componentes do sistema de energia são adequadas, o suficiente, para proteger um sistema de energia.

Diante desses pressupostos, buscou-se o uso de técnicas de computação aplicadas à disciplina de Circuitos Elétricos, uma vez que possui um conteúdo rico em formulações matemáticas e possibilita o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias, via softwares livres como o *SciLab*, software de modelagem e simulação empregado em diversas áreas das ciências exatas, como engenharias, petroquímica, meteorologia e indústria automobilística, na busca por solução de cálculos numéricos que possuem certo grau de complexidade utilizando lógica computacional. Os simuladores têm um importante papel

na produção de conhecimento, isto é, através deles é possível criar um elo entre a matéria exposta em livros, materiais didáticos e salas de aula com os conhecimentos práticos da área de Engenharia Elétrica.

As ferramentas de simulação de domínio de professores e estudantes de Engenharia Elétrica, como o *Proteus* e *Multisim*, são de natureza numérica, ou seja, o usuário apresenta os dados de entrada, eles são iterados ao circuito e, então, é apresentado um vetor como resposta e um gráfico plotado com a relação dados de saída versus tempo. Tais resultados não ajudam os usuários a compreender a natureza dos circuitos como sistemas lineares. Além disso, muitas plataformas são licenciadas em suas versões mais abrangentes, impossibilitando o aluno de ter o simulador em seus notebooks ou computadores pessoais, somado a isto, não permitem a inserção de outros elementos de análise. Nesse sentido, desenvolveu-se uma ferramenta computacional de simulação que possui o passo a passo na resolução de problemas típicos da disciplina de Circuitos Elétricos, aplicada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão durante os anos de 2019 e 2020.

3 | SIMULAÇÃO DE APLICAÇÕES DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

As técnicas fundamentais usadas na análise de Circuitos Elétricos são as leis de Ohm e Kirchhoff, descritas em praticamente todos os livros de Engenharia Elétrica (BOYLESTAD, 2012), (DORF, 2016), (JOHNSON, 1994), (NILSSON, 2009) e (SADIKU, 2013). Como os circuitos elétricos são constituídos por diversos elementos, algumas sistemáticas são necessárias na análise, isto é, após a verificação na literatura base, desenvolveu-se uma ferramenta computacional de simulação de caráter interativo, corrigindo as limitações dos simuladores existentes em relação à dispersão de dados para o usuário, além de ser desenvolvido em plataforma aberta para modelagem e simulação. Nas subseções serão apresentadas algumas aplicações da plataforma.

3.1 Análise de Circuito de Primeira Ordem

Quando se associam elementos como capacitores e indutores, conforme a figura 1, o circuito passa a apresentar equações diferenciais que descrevem o funcionamento de seus componentes. A partir disso, as relações de corrente e tensão são representadas pelas equações (1) e (2), respectivamente, (NILSSON, 2009).

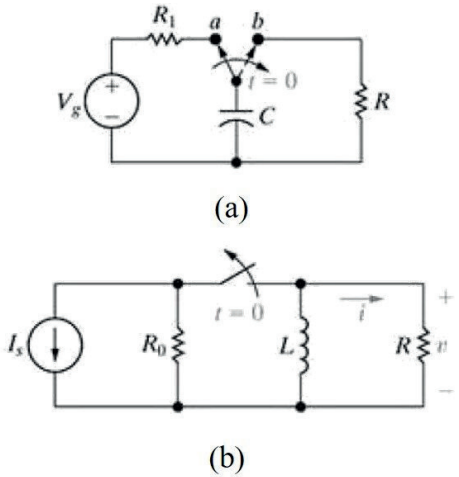


Figura 1. (a) Circuito composto por Resistor e Capacitor (RC) (b) Circuito composto por Resistor e Indutor (RL)

Fonte: NILSSON, 2009.

$$i = C\frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$v = L\frac{di}{dt} \quad (2)$$

onde denomina-se C como capacitância e L como indutância.

Os Circuitos Elétricos de Primeira Ordem apresentam o chaveamento, representado por uma dependência temporal, para tempo de carga e descarga dos elementos indutivos e capacitivos. Diante disso, a resposta do circuito para a excitação da fonte de tensão e corrente para circuito resistivo-capacitivo (RC) e resistivo-indutivo (RL) são dadas pelas equações (3) e (4), respectivamente, (SADIKU, 2013). Para tal implementação, utiliza-se o seguinte algoritmo descrito no Algoritmo 1.

$$v(t) = V_o e^{-RC/\tau} \quad (3)$$

$$i(t) = I_o e^{-R/L\,\tau} \quad (4)$$

onde τ é a constante de tempo; V_o e I_o são as tensões e correntes iniciais para os modelos analisados, respectivamente.

Algoritmo 1: Análise de Circuito de Primeira Ordem

Informar o tipo de circuito analisado: RC ou RL

Caso 1: Circuito RC
Informar a tensão inicial do circuito
Informar o valor de R
Informar o valor de C
Calcular a constante de tempo
Exibir os resultados na tela
Caso 2: Circuito RL
Informar a tensão inicial do circuito
Informar o valor de R
Informar o valor de L
Calcular a constante de tempo
Exibir os resultados
Finalizar a rotina

3.2 Análise de Circuito de Segunda Ordem

Ao associar resistores, capacitores e indutores, o circuito em análise passa a ser caracterizado por uma equação diferencial de segunda ordem. O circuito, com a presença dos dois elementos de armazenamento de energia, pode assumir duas formas, em paralelo ou em série, representadas pela figura 2, respectivamente. A disposição em que os elementos se encontram no circuito altera a forma de calcular a resposta do sistema a uma excitação inicial, seja por uma fonte tensão ou corrente. Pela característica quadrática da configuração em série e em paralelo, dadas pelas equações (5) e (6), respectivamente.

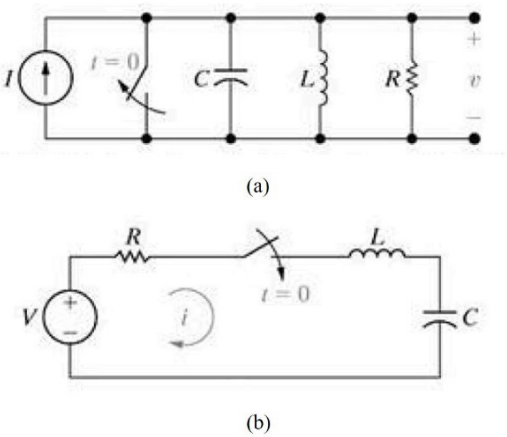


Figura 2. (a) Circuito RLC em paralelo (b) Circuito RLC em série.
Fonte: NILSSON, 2009.

$$s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (5)$$

$$s^2 + \frac{R}{L}S + \frac{1}{LC} = 0 \quad (6)$$

Pela característica quadrática da equação (5) para o caso em série e a equação (6) para o caso em paralelo, pode-se extrair raízes, expressas pelas equações (7) e (8).

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \quad (7)$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2} \quad (8)$$

onde a e w_0 são as frequências de Neper ou fator de amortecimento e a frequência ressoante, respectivamente. As frequências de Neper para o caso série e paralelo e a frequência ressonante, são expressas pelas equações (9), (10) e (11), respectivamente;

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (10)$$

$$\omega_O = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Os valores numéricos encontrados determinam o tipo de amortecimento à excitação inicial da fonte de tensão ou corrente para o circuito, como podem ser observados na Tabela 1.

Caso	Resposta do circuito
$\alpha > \omega_O$	Super amortecida
$\alpha = \omega_O$	Criticamente amortecida
$\alpha < \omega_O$	Sub-amortecida

Para tal implementação, utiliza-se o seguinte algoritmo descrito no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Análise de Circuito de Segunda Ordem

Informar a disposição dos elementos do circuito analisado

Informar os valores de tensão ou corrente inicial

Calcular as frequências de Neper e de ressonância

Caso 1: $a > w_0$ (Super amortecida)

Calcular as raízes da equação característica

Calcular os coeficientes da equação característica

Exibir os resultados

Caso 2: $a = \omega_0$ (Criticamente amortecida)
Calcular as raízes da equação característica
Calcular os coeficientes da equação característica
Exibir os resultados
Caso 3: $a < \omega_0$ (Sub-amortecida)
Calcular as raízes da equação característica
Calcular os coeficientes da equação característica
Exibir os resultados
Finalizar a rotina

4 I RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Com base na seção anterior, implementou-se uma plataforma didática para simulação computacional para análise de circuitos elétricos. A modelagem de formulações matemáticas em rotinas computacionais possibilita que os estudantes trabalhem a multidisplinidade durante o curso. Utilizando os conceitos de Aprendizagem Ativa, cada aplicação que será descrita apresentou um objetivo específico, propiciando o desenvolvimento de habilidades de análise, construção de formulações matemáticas e interpretação de gráficos relacionados a cada tópico apresentado.

4.1 Análise de Circuito de Primeira Ordem

Como demonstrado na Subseção 3.1, os circuitos analisados apresentam capacitores e indutores, tais elementos apresentam característica exponencial, especificadas pelas equações (1) e (2). Como peculiaridade observa-se a dependência temporal para carregamento, analisada em instantes de tempo menor e maior que 0 segundos. Neste circuito, o estudante precisa ter os conhecimentos de equações diferenciais de primeira ordem, sistema de unidades, constantes e notações exponenciais, além das condições iniciais de tensão ou corrente, possibilitando aos alunos revisar assuntos iniciais, por conseguinte, trabalhar a multidisciplinaridade entre os conhecimentos e aplicação de conceitos de análise de circuitos elétricos. Para o seguinte arranjo de circuito, pode-se exemplificar com dados (para o caso de circuitos RL e RC em paralelo), rotina computacional e gráficos (figuras (3 (a), (b), (c), (d) e (e)) e (4)), apresentados a seguir.

Dados experimentais
Caso 1: Circuito RL
Corrente inicial de 0 A; Corrente final de 15 A; R = 45 Ω; L = 90 mH.
Caso 2: Circuito RC
Tensão inicial de 0 V; Tensão final de 12 V; R = 45 Ω; C = 0.2 μF.

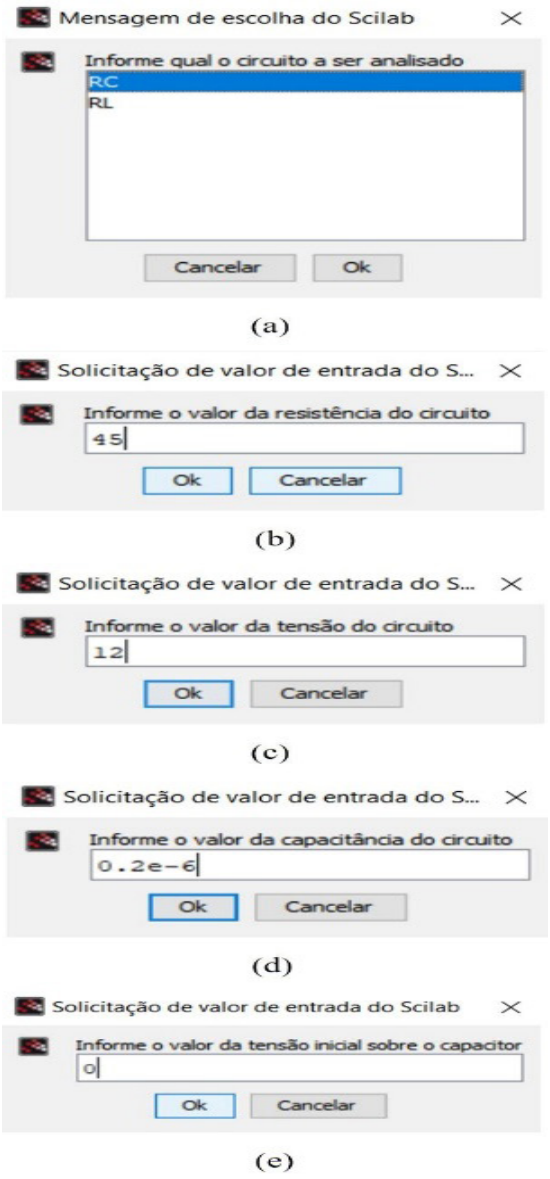


Figura 3. Caixas de diálogo utilizadas pelos usuários.

Fonte: Arquivo pessoal.

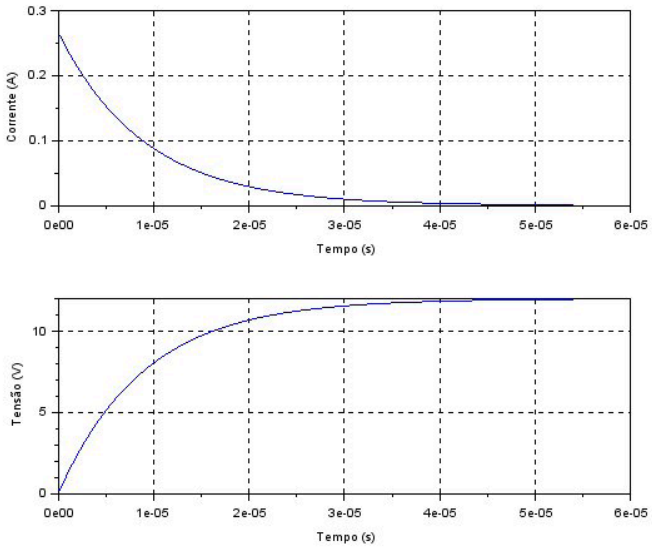


Figura 4. Resultado computacional para o circuito RL.

Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 Análise de Circuito de Segunda Ordem

Por fim, ao analisar o item descrito na Subseção 3.2, os circuitos apresentam os três elementos descritos anteriormente a saber, resistores, indutores e capacitores. A característica exponencial é observada através das equações (7) e (8), apresentando uma dependência de dois termos matemáticos, a e w_0, frequências de Neper e de ressonância, respectivamente. De acordo com os valores encontrados para ambos os termos, pode-se obter três tipos diferentes de resposta, a saber, Super amortecida, Criticamente Amortecida ou Sub-amortecida. Por meio dos conceitos de Aprendizagem Ativa, na análise de circuito de segunda ordem, o estudante utiliza conceitos de equações diferenciais de segunda ordem, operações matriciais, análise de circuitos mais complexos, com a finalidade de calcular a equação característica em função da corrente ou tensão inicial. Pode-se exemplificar através dos dados apresentados a seguir, a rotina computacional e respectivos gráficos (figuras (5 (a), (b), (c), (d) e (e))), (6 (a), (b), (c), (d) e (e)), (7) e (8)).

Dados experimentais

Caso 1: Circuito RCL em paralelo

Corrente inicial de 0 A; Tensão inicial de 0 V; Corrente final = 15 A; R = 480 Ω; L = 90 H; C = 0.2 μF.

Caso 2: Circuito RCL em série

Tensão inicial de 0 V; Corrente inicial de 0 A; Tensão final de 15 V; R = 750 Ω; L = 25 H; C = 0.2 μF.

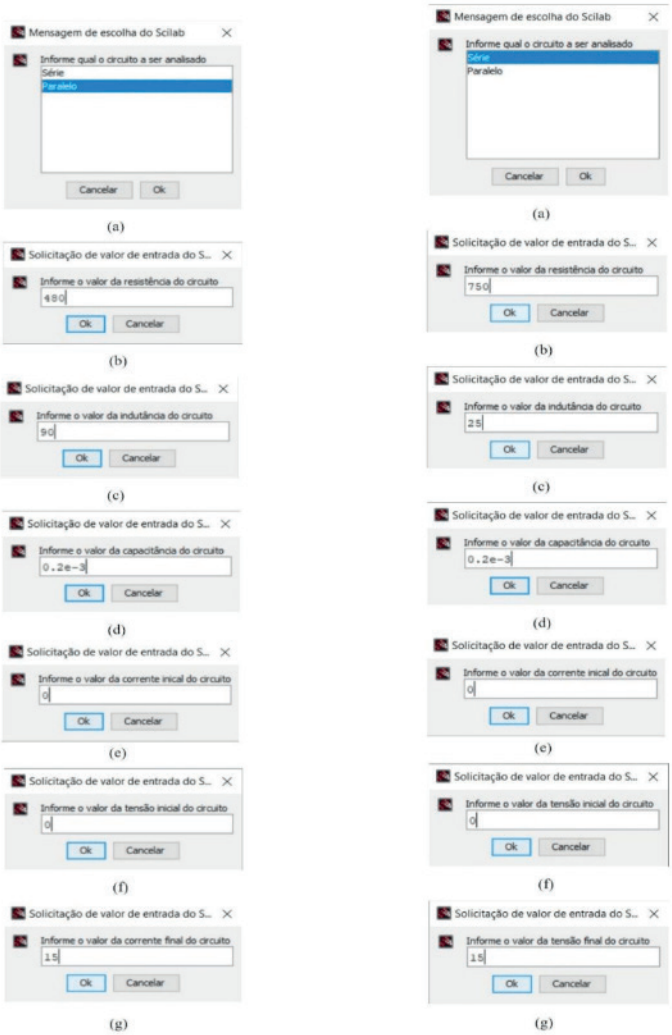


Figura 5 e 6. Caixas de diálogo utilizadas pelos usuários para o circuito RLC Paralelo e Série.

Fonte: Arquivo pessoal

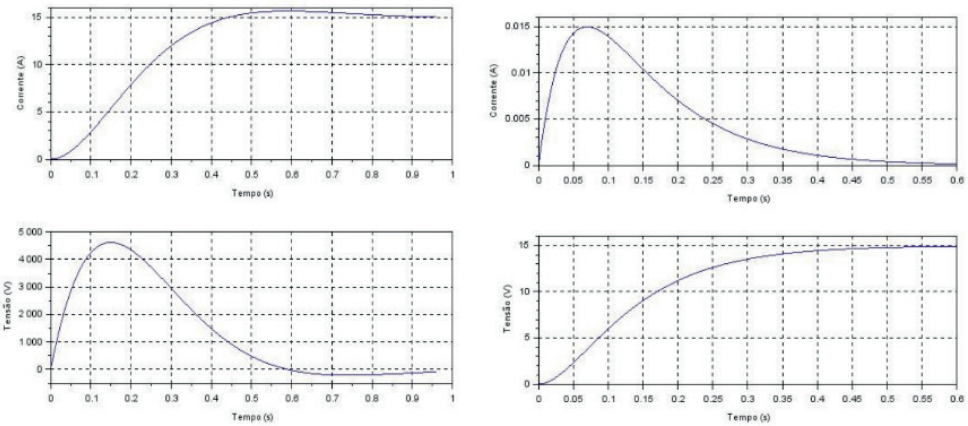


Figura 7 e 8: Resultado computacional para o circuito RLC em paralelo (à esquerda) e RLC em série (à direita)

Fonte: Arquivo pessoal.

5 I CONCLUSÃO

O desenvolvimento da plataforma didática para simulação computacional, utilizada em análise de circuitos elétricos, propicia o conhecimento, discussão, multidisciplinaridade, aplicação e reflexão sobre o uso de técnicas de Aprendizagem Ativa. Ao ser inserida na disciplina de Circuitos Elétricos do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, a ferramenta computacional permitiu maior autonomia para os estudantes, seja na resolução dos problemas propostos em sala de aula, como também, no aprendizado e na percepção da importância de cada teorema de análise de circuitos, bem como, de cada etapa seguida por cada um destes teoremas, o que contribuiu para o fortalecimento do ensino, em especial, no contexto de aulas remotas e/ou on-line.

Observou-se que, com a aplicação da aprendizagem baseada em problemas, obteve-se a construção de conhecimentos de forma multidisciplinar, reforço dos conceitos passados em sala de aula, interação entre alunos de forma colaborativa, desenvolvimento de estratégias e melhora significativa no processo de ensino-aprendizagem. A nova concepção pedagógica será aplicada de forma gradual em demais disciplinas, dando continuidade à discussão da temática de Aprendizagem Ativa, incentivando a interação no ambiente acadêmico entre alunos e professores em disciplinas e projetos para cursos superiores nas instituições de ensino e podendo ser posteriormente replicada em outros ambientes, aumentando sua gama de aplicações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Monte Castelo e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) pelo apoio financeiro e fomento para este presente estudo.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R. **Introdução a análise de circuitos**. Rio de Janeiro, Pearson Prentice Hall, 2012.

BRASIL, Ministério da Educação. **Lei de diretrizes e bases da educação nacional**. Brasília, Senado Federal, 2018.

DORF, R.; SVODODA, J. **Introdução aos Circuitos Elétricos**. Rio de Janeiro. LTC, 2016.

FARIAS, P.; MARTIN, A.; CRISTO, C. **Aprendizagem ativa na educação em saúde: Percurso histórico e aplicações**. Rev. bras. Educ. Med, 2015.

GABRIEL, M. **Você, Eu e os Robôs - Pequeno Manual do Mundo Digital**. São Paulo, GEN, 2017.

JOHNSON, D.; HILBURN, J.; JOHNSON, J. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. Rio de Janeiro, LTC, 1994.

KAZERUNI, N.; LABOY, A.; HESS, H. **Designing a hybrid engineering course combining case-based and lecture-based teaching**. IEEE, 2018.

KULGINA, A.; SHAROVA, D.; VOSTRIKOV, A.; PROKOFEVA, E. **Development of software module for the analysis of electrical circuits**. IEEE - 2019 International Conference On Numerical Simulation Of Optoelectronic Devices (NUSOD), 2019.

NAN, B. **As metodologias ativas e a promoção da automação de estudantes**. Semira Ciênc Soc Hum, 2019.

NILSSON, J.; RIEDEL, S. **Circuitos elétricos**. Rio de Janeiro, Pearson Prentice Hall, 2009.

SADIKU, M.; ALEXANDER, C. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre, AMGH, 2013.

SHAPOVALOV, Y.; BACHYK, D.; ROMANO, R.; CHABAN, K. **Modeling linear electrical circuits with time - variable inductances by the frequency symbolic method**. IEEE - 2019 IEEE 15th International Conference On The Experience Of Designing And Application Of Cad Systems (CADSM), 2019.

ZEGGAI, A.; BENHAMIDA, F. **Nucleic acid content of microscope**. Nature, 135, 7–9, 2019.

CAPÍTULO 25

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

Data de aceite: 01/05/2021

Mauricio Andrade Nascimento
IFBA- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia/Engenharia Civil Barbalho, Salvador - Bahia-Brasil
http://lattes.cnpq.br/0226861258633206

Ednildo Andrade Torres
Universidade Federal da Bahia/Escola Politécnica/TECLIM/CIENAM/LEN Federação – Salvador - Bahia-
http://lattes.cnpq.br/2483185411923070

RESUMO: No Brasil a indústria da construção representa cerca de 3,7% do PIB, e os edifícios são responsáveis por 36% no consumo de energia primária respondendo por 39% das emissões de CO2. Conhecer o consumo energético associado aos materiais e processos construtivos, e a energia consumida nas fases do ciclo de vida de uma edificação, proporciona uma melhor adequação nas escolhas das especificações, permitindo que haja interferências ou alterações nos processos construtivos, de forma a conceber um produto final eficiente nos aspectos de consumo energético e de sustentabilidade. Este trabalho propõe a avaliação de um estudo considerando a abordagem energética, financeira e ambiental na construção de edifício multi-laboratórios, no campus da UFBA, em Salvador-BA. Foram realizados: inventário dos principais materiais utilizados na construção; levantamento da energia incorporada considerando às suas reposições ao longo da vida útil; o levantamento dos encargos energéticos associados com a utilização e operacionalização do edifício através da consideração de bancos de dados disponíveis na literatura e de bancos construídos. Permitiu-se a comparação e interferência nos processos e na substituição de materiais antes especificados por padrão, por materiais de menor energia incorporada, resultando num ganho em eficiência energética no produto final. Avaliar energeticamente, pela ótica do ciclo de vida, contribui para formação de bancos de dados energéticos nacionais de materiais e processos construtivos, enquanto proporciona uma metodologia para composição de índices energéticos para o setor de construção, deficitário no quesito de quantidade e qualidade de informações para subsidiar avaliações de impacto e de consumo energético visando a sustentabilidade. Os resultados demonstraram a possibilidade de somar eficiência energética com resultados econômicos, obtendo melhores resultados ambientais. A ferramenta proposta é extremamente produtiva no auxílio à escolha por construções mais eficientes e sustentáveis, podendo ser utilizada em outros setores de produção, e aplicada como mecanismo de controle e gestão pública.

PALAVRAS - CHAVE: Sustentabilidade ; eficiência energética; Análise de ciclo de vida; Gestão pública; Gestão Urbana.

ABSTRACT: In Brazil, the construction industry represents about 3.7% of GDP, while buildings are responsible for 36% of primary energy consumption and account for 39% of CO2

emissions. The knowledge of energy consumption associated with materials and construction processes, and energy consumed in life cycle's phases of a building, provides a better fit in the choices of specifications, and interference in the construction processes, in order to design a more efficient product concerning aspects of energy consumption and sustainability. Were carried out: inventory of the main materials used in construction; energy assessments, considering its replacement throughout its useful life; the survey of energy burdens associated with the use and operation of the building through the consideration of databases available in the literature and of built banks. The inventory allowed the comparison and interference in the processes, and in the replacement of materials, previously specified by default, with materials with less embodied energy, resulting in energy efficiency gain by the end of the product. This energy assessment, through the analysis of the life cycle, contributes to the knowledge and formation of national's energy databases of materials and construction processes, meanwhile that it provides a methodology for the composition of the energy indexes of the construction segment, which is very deficient in quantity and quality of information needed to support impact assessments and energy consumption for sustainability. The results demonstrated the possibility of adding energy efficiency with economic results in the construction process, obtaining as well better environmental results. The proposed tool is extremely productive in helping to choose a more efficient and sustainable construction, which can be used in other sectors of production, and applied as a control and public management mechanism.
KEYWORDS: Sustainability; energy efficiency; Life cycle analysis; Public Management; Urban Management.

1 | INTRODUÇÃO

De acordo com as projeções do Internacional Energy Outlook (IEO), o consumo mundial de energia entre 2018 e 2050 crescerá em função da taxa média de crescimento do PIB mundial de 3,0% a.a, onde a maior projeção estimou-se em 3,7% e a mais conservadora 2,4% de crescimento. Sendo o crescimento médio estimado de 1,5% nos países OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e 3,8% nos não OECD, no qual se inclui o Brasil. Este crescimento se dará mais forte nos países em desenvolvimento devido ao resultado do seu maior crescimento econômico esperado. Atualmente, espera-se que um maior crescimento econômico ocorra em economias emergentes, especialmente China, Índia, países da Ásia e África, onde o Produto Interno Bruto (PIB) será aumentado a uma taxa média estimada de 4,0% ao ano. Até 2050 há uma expectativa de que esse crescimento demande um aumento no consumo energético da ordem de 50% (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019).

O crescimento econômico está diretamente associado ao consumo de energia, visto que para qualquer atividade que resulte em produtividade econômica, necessariamente haverá um ambiente construído que possibilite a execução desta atividade. O setor da construção portanto, representa grande parcela neste consumo energético dentro de qualquer sociedade pois é o setor diretamente responsável para a realização do mínimo de infra-estrutura necessária para a realização da atividade econômica. O Brasil, país

considerado como emergente, acompanha os seus semelhantes na tendência com relação ao crescimento mais acelerado do PIB e um aumento na procura por energia, característica esta prevista pelas projeções de consumo energético quando da comparação com o crescimento dos países desenvolvidos. De acordo com o INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2019), os edifícios responderam por cerca de 36% no consumo de energia primária e cerca de 39% das emissões de CO_2 em 2018. Assim, a indústria da construção civil tem uma importância relevante no cenário do país e para o desenvolvimento econômico, pois foi responsável em 2019 por cerca de 3,7% do PIB, mesmo estando em desaceleração nos últimos anos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE, 2019).

O processo construtivo, devido a sua demanda energética ao longo de todo o seu ciclo de vida, causa impacto ambiental. Deste modo, a concentração de esforços no entendimento das relações energéticas e de seus impactos relacionados nas diversas etapas construtivas, se faz necessária na busca por eficiência energética na atividade de construção. A detenção deste conhecimento pode representar uma poderosa contribuição para reduzir a demanda de energia e os impactos ambientais gerados associados a esta demanda. A obtenção do melhor equilíbrio entre as relações entre a demanda de energia: na concepção do projeto; na escolha de materiais; escolha dos processos construtivos; das interferências com o meio ambiente; e das tecnologias de produção, podem minimizar o seu impacto final. Uma maior informação e compreensão, por parte dos gestores, de como se comportam as relações entre consumo energético e impacto ambiental gerado decorrente deste consumo, possibilita a tomada de decisões e de planejamento mais assertiva. E esta informação pode ser produzida e provida a partir de metodologias e estudos desenvolvidos para levantamento das demandas por energia, por tipificação e atividade fim do empreendimento, considerando todo o seu ciclo de vida.

A estimativa do consumo de energia relacionado com as fases do ciclo de vida de um edifício, permite a compreensão individual das demandas energéticas para cada fase, enquanto possibilita uma visão globalizada do resultado energético final de energia incorporada numa determinada construção. Através do consumo energético podem ser co-relacionados e mensurados os impactos ambientais estimados locais e globais, classificados em diversas categorias de impacto a exemplo da: acidificação das chuvas; índice de carcinogênicos; potencial de aquecimento global entre outros. Com base no consumo energético, relacionado ao potencial de emissão do CO_2 na atmosfera, é possível estimar, por exemplo, o potencial de aquecimento global relativo ao impacto gerado por determinado empreendimento. Análise dos resultados de impacto, por sua vez permitem a comparação e previsão do impacto associado entre projetos de empreendimentos de construção antes mesmo destes serem realizados. Estes dados energéticos e consequentemente de impacto, são essenciais para a compreensão das possibilidades de redução dos impactos ambientais associados a evento de construção, bem como

dos recursos utilizados, componentes materiais e processos. Esses três fatores: energia incorporada, custos de construção e impactos ambientais gerados, estão interligados e devem fazer parte das análises de gestão quando da formatação, licença ou permissão construtiva, e escolha por determinado projeto.

Essa abordagem, considerando a análise de ciclo de vida (ACV), permite a construção e formação de uma base de dados para simulações construtivas e de custos ambientais e energéticos como resultado de uma determinada construção. A grande lacuna para a adoção, pelos envolvidos na execução e gestão do setor construtivo, desta prática de análise conjunta entre custos, demanda energética e impacto ambiental gerado, ocorre principalmente devido à: falta de bancos de dados de energia incorporada nos materiais e processos; falta de metodologias consistentes e de fácil aplicação; associados à falta de informação. A carência de informação sobre os impactos gerados pela atividade construtiva e dos custos relativos a implantação de tecnologias mais sustentáveis consiste em grande barreira a ser transposta na consolidação de um setor construtivo mais eficiente e sustentável.

Acredita-se que a informação obtida na análise particular deste estudo de caso é útil para o setor da indústria da construção. Funcionando como uma ampla ferramenta de gestão, produção de informação, construção metodológica de fácil aplicação, que pode trazer benefícios para a sociedade como um todo, na medida que contribui para o conhecimento das possibilidades de redução dos impactos ambientais gerados no setor de construção.

Este artigo propõe a avaliação de um estudo de caso considerando a abordagem energética, financeira e ambiental na construção de edifício multi-laboratórios, no campus da Universidade Federal da Bahia -UFBA, em Salvador-BA. O objetivo do estudo consistiu na avaliação da energia associada com a construção da edificação ainda na sua fase inicial de projeto e design.

Com 1.760 m² de área construída total, este edifício abriga laboratórios multiusuários que estão divididos em um piso térreo e mais três andares superiores. Cada pavimento foi concebido para abrigar quatro salas com cerca de 75 m^2 cada. Foram previstas na concepção a modulação e divisão das salas, bem como a facilitação na adequação dos ambientes. Por esta razão, a estrutura foi concebida privilegiando vãos livres, evitando a distribuição de cargas em poucas colunas estruturais e paredes. A cobertura, seguindo os mesmos princípios de transparência e visibilidade dos pisos inferiores, foi planejada para permitir a colocação de diversos equipamentos para monitoramento ambiental e auto-sustentabilidade do edifício.

Por estar ainda na sua fase de concepção e de se assemelhar ao estilo das construções existentes ao redor do campus, o que possibilitaria a comparação fidedigna em termos de tipologia e serviços prestados à comunidade, a escolha desta edificação como projeto de estudo base conferiu característica positiva nesta modalidade de análise.

A possibilidade de comparação à construção anteriormente planejada nos moldes padrão das construções existentes no campus, quanto as características construtivas, atribuem diferencial a este estudo. A possibilidade da nova e desafiadora concepção de projeto, atribuindo os aspectos de construção e utilização final, contemplando a visão de reduzir os impactos ambientais e de contribuir para a sustentabilidade do edifício, também atribui uma grande relevância por sua observação e análise.

Este estudo centrou as suas avaliações nos aspectos de: fase de extração de matérias-primas e consumo de energia na produção de materiais; fase de construção e as demandas de energia nos processos construtivos; na energia consumida na fase operacional da edificação; energia na fase de manutenção no horizonte de vida útil projetada; e culminado com a obtenção do índice de energia final por metro quadrado (m^2) construído. Duas hipóteses construtivas para o mesmo edifício foram consideradas na avaliação: a primeira envolveu a utilização de materiais, especificações, e sistemas construtivos de acordo com a aplicada para os edifícios existentes no campus. A segunda considerou um novo desenho da concepção de fachadas, e adoção de novos materiais e sistemas construtivos do edifício, com o objetivo de reduzir o consumo de energia durante as diversas fases do seu ciclo de vida.

Os resultados foram obtidos com base nas avaliações dos processos de eficiência energética, incluindo a escolha de materiais de baixa energia, e o consumo de energia primária que foi avaliado durante o ciclo de vida de construção, considerando a vida útil estimada de projeto. Com base nos dados gerados, e com o intuito de observar a sua relação com os resultados de eficiência energética obtidos, foram também incluídos na consideração os custos praticados para as duas hipóteses durante o ciclo de vida do produto, contemplando para tal: o custo financeiro de aquisição de materiais e de montagem para a construção; os custos de energia na fase de utilização na construção; e os custos de manutenção e reparação ao longo da sua vida útil.

Esta abordagem atribui uma melhor compreensão das possibilidades de intervenção no processo construtivo e dos seus custos decorrentes, tanto na sua fase inicial, quanto em fases posteriores, permitindo uma análise qualitativa na relação entre os custos praticados nas intervenções e no resultado econômico final.

2 | REVISÃO DE LITERATURA

Existem vários pontos críticos com relação às atenções relacionadas ao meio ambiente no Brasil: o desmatamento da floresta amazônica e a poluição urbana são dois dos grandes problemas. O urbanismo, que se por um lado objetiva a transformação do espaço visando uma melhoria estética e da qualidade de vida, enquanto transmite segurança e conforto, por outro, também consiste em importante questão com relação ao meio ambiente. O Desenvolvimento econômico, que impulsiona o setor construtivo, também

invoca atenção para os problemas ambientais. A “edificação verde” já é considerada com grande poder no desempeno de papel relevante no esforço para tornar as cidades brasileiras mais saudáveis e mais sustentáveis.

O setor da construção que é responsável por parte significativa da economia no Brasil, é também relevante no consumo de matérias primas naturais, atingindo níveis que variam de 15% a 50% de todos os recursos naturais consumidos na sociedade (JOHN e AGOPYAN, 2003).

Associado a este fato, o setor construtivo responde por parcela significante de contribuição na produção de resíduos, sendo, portanto um dos setores que mais impactam o meio ambiente no quesito relacionado as emissões de poluentes. Mais de 50% da massa de resíduos urbanos são provenientes de canteiro de obras, de acordo com Pinto (1999), e como no Brasil não há prática usual na utilização destes resíduos proveniente da construção, a exemplo dos países europeus que chegam a reciclar quase que 90% dos resíduos, de acordo com Dorsthorst e Hendriks (2000), estabelece-se uma questão de ordem pública quanto a necessidade de melhoria na gestão dos rejeitos. Este fato implica em diversos problemas de gestão urbana, normalmente encontrados nos grandes centros e que também implica na qualidade do saneamento básico e na saúde como um todo. De acordo com Furtado (2003), além de ser um dos setores mais influentes nas atividades sociais e econômicas de um país, a construção é também uma importante fonte de degradação ambiental, o que reforça a necessidade na atenção para o setor, a fim de torná-lo ambientalmente e economicamente sustentável. Como afirma Kiperstok et al. (2020) “... A proposta de adoção da prevenção da poluição como um princípio tem de considerar todos os aspectos que podem reduzir o impacto ao meio ambiente ...”. Portanto, as bases do setor da construção devem ser apoiadas por princípios, tais como: redução dos resíduos gerados, melhora da eficiência no uso dos recursos naturais e no consumo de energia, prevenção da poluição, além de planejamento integrado entre construção e ambiente. Esses princípios remetem o setor de construção para a utilização de processos de produção mais limpa e de análise do ciclo de vida (ACV), de forma a prever e planejar futuros impactos decorrentes da atividade construtiva.

É uma observação factível afirmar que os profissionais envolvidos no setor de construção são os mais relevantes para influenciar nas mudanças e intervenções nos processos inerentes a atividade construtiva. Portanto, as atitudes e percepções desses profissionais têm influência significativa sobre a meta para alcançar o desenvolvimento sustentável deste setor. Isto consiste num grande obstáculo a ser transposto para chegar ao objetivo na prática por construções mais sustentáveis. Haja visto que grande parte dos profissionais da indústria da construção atualmente reconhecem que os edifícios sustentáveis são importantes para o meio ambiente, contudo, eles subestimam a contribuição dos edifícios no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a publicação do WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

(2007), quando profissionais do setor de construção foram questionados sobre o CO_2 liberado direta ou indiretamente no meio ambiente pela contribuição dos edifícios, e sobre a percentagem no aumento de custos para a realização de um empreendimento certificado como sustentável em comparação com um projeto normal, as respostas denotaram uma distorção em relação a percepção real. Os resultados deste questionamento representado graficamente se apresentaram como mostrado nas Figuras 1 e 2.

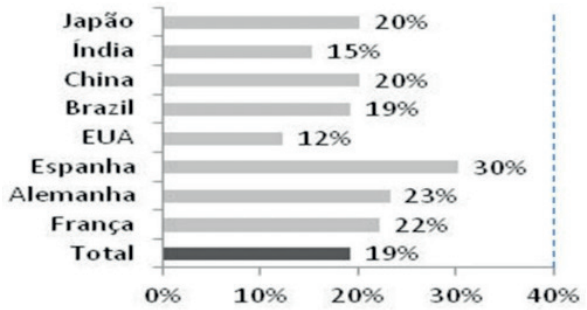


Figura 1 - Contribuição das construções nas emissões totais de CO2.
Fonte: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007

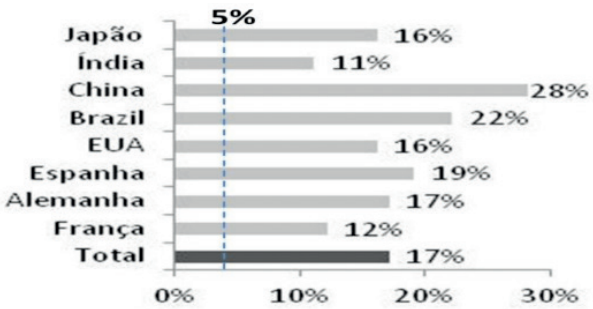


Figura 2 - Acréscimo de custo para construção ambientalmente certificada.
Fonte: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007.

A análise destes dados demonstra que os profissionais superestimam o custo adicional de um edifício certificado e ambientalmente sustentável, que é de **cerca de 5%** para os países desenvolvidos, e subestimam a contribuição dos edifícios para as emissões de gases de efeito estufa, que é atualmente **cerca de 40%**. Cabe ressaltar que a cultura, costumes, e situações particulares influenciam obviamente nesta percepção e as diferenças entre opiniões mostram que a influência do ambiente local possivelmente determine diferentes visões sobre os fatores que influenciam a sustentabilidade. Isso reforça a visão

que o grau de educação, informação e conhecimento são fatores cruciais em ações globais e intervenções que podem ser feitas no setor para o desenvolvimento sustentável.

No que tange a consideração de um dado processo na produção de materiais básicos para construção por exemplo, é fundamental a consciência sobre os impactos decorrentes desta atividade para um melhor resultado na busca da prevenção de possíveis danos ambientais, e tal abordagem, através deste conhecimento adquirido, permitirá a realização de processo mais sustentável.

A análise do ciclo de vida de uma construção pode ajudar a compreender estes impactos. Esta análise poderia ser definida como o processo em que o fluxo de materiais e energia circulando em um dado sistema são quantificados e avaliados. Nas metodologias observadas na literatura, esta avaliação é realizada em etapas, muitas vezes considerando todo o ciclo que envolve: a extração, a produção, construção, transporte e, em fases posteriores, a consideração de demolição e disposição final. Numa segunda hipótese de consideração, os impactos globais e/ou regional são calculados com base no consumo de energia, geração de resíduos e outras categorias de impacto (SCHEUER , KEOLEIAN e REPPE, 2003). Em geral, o sector da construção é considerado responsável por 30% a 40% da procura de energia total de uma sociedade, e aproximadamente 44% dos recursos materiais utilizados, assim como parte de quase 1/3 da emissão total de CO_2 na atmosfera (ERLANDSSON, BORG, 2003p. 919-938).

Desta forma, através da consideração destes dados, é possível admitir que, a redução dos encargos ambientais associados ao evento de construção é indispensável para o planejamento e desenvolvimento sustentável. Pesquisas realizadas em todo o mundo atribuem conhecimento sobre a influência nos impactos ambientais para diferentes tipos de materiais e processos na construção.

Uma quantidade considerável de energia é utilizada em processos de fabricação e transporte de materiais utilizados na construção, e a redução no consumo de energia está diretamente relacionada à redução das emissões atmosféricas e outros impactos ambientais. A observação de alguns estudos relacionados mostra a importância da análise de dados e sua participação em qualquer estimativa feita durante o ciclo de vida dos edifícios. A fabricação de materiais de construção contribui de fato para a produção dos gases de efeito estufa, tais como o dióxido de carbono, e há uma grande preocupação na redução das emissões decorrente destes gases a fim de mitigar os impactos ambientais.

Buchanan e Honey (1994, p. 205-217), desenvolveram estudos na Nova Zelândia que envolvem a energia necessária para produção e processamento de diferentes materiais de construção e suas correlações com as emissões de CO_2 e suas implicações ambientais, e também demonstraram que a construção de casas multi-pavimentos feitas em madeira necessitam menor energia por (m^2), e geram menos emissões de CO_2 do que as casas feitas de aço ou concreto armado. Trabalhando com a mesma ideologia, Kirk e Dell'Isola (1995, p. xiii, 262) e Oka et al. (1993, p. 303-311) estimaram e atribuíram o

uso de energia para a fabricação e montagem de materiais, associando-os aos impactos ambientais. Ambos estudos objetivaram conhecer as relações energéticas e atribuição de uma metodologia de consideração que possibilitasse a comparação do potencial de impacto ambiental gerado por estes materiais e processos. Outros estudos compararam a energia necessária e as emissões de CO_2 por metro quadrado de área de construção para diferentes tipos de empreendimentos.

Na Índia, país que possui grande dificuldade no suprimento de energia, considerado emergente assim como o Brasil, em Debnath et al. (1995, p. 141-146) desenvolveram um estudo comparativo de energia necessária para diferentes tipos de construção residencial. Três tipos de construções foram avaliados de modo comparativo: individuais, duplos e múltiplos andares, onde o consumo de energia por área construída foi estimado em cerca de 3,05 GJ/m^2. Vale ressaltar que nesta pesquisa foram consideradas a energia necessária apenas para os materiais e os processos de construção dos edifícios. Por conclusão, foram identificados que os blocos, o cimento e o aço foram os três principais contribuintes para o encargo energético de construção.

De acordo com a linha de pesquisa e consideração de diversos autores, a utilização de materiais alternativos ou a redução na energia para a sua fabricação podem contribuir na consolidação da energia final de um empreendimento realizado, e devem ser contabilizadas objetivando a redução na utilização de energia em um edifício, outros estudos avançaram no aprofundamento do comportamento energético de uma edificação e investigaram sua concepção estrutural.

Eaton e Amato (1998, p. 286-287) realizaram uma análise de ciclo de vida (ACV) em construção, comparando edifícios estruturados em aço e concreto, dando atenção para a influência desses materiais na contribuição total de energia nos edifícios. Há uma variedade de trabalhos relatados na literatura sobre métodos aplicados à análise do ciclo de vida relacionada com a atividade de construção, alguns, em particular, são de fundamental importância para a compreensão e discussão dos resultados e da base do conhecimento das análises de ciclo de vida voltadas para mensuração da energia incorporada em construções. Pode-se citar: o trabalho de Venkatarama Reddy e Jagadish (2003, p. 129-137) realizado na Índia, o estudo de caso realizado por Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064) na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos da América, o estudo de Li (2006, p. 1414-1422) no Japão, entre tantos outros trabalhos investigados a exemplo de: Martinez (2010), Verrier et al.(2014), e De Carvalho et al.(2017).

O estudo realizado na Índia por Venkatarama Reddy e Jagadish (2003, p. 129-137) que segue a prática da ideologia de Debnath et al. (1995, p. 141-146), considerou a inclusão da parcela de energia referente aos eventos de transporte na quantidade total de energia necessária para a fabricação de diferentes tipos de materiais básicos aplicados na construção. De acordo com estes autores a energia incorporada, e implícita a realização de um empreendimento poderia ser descrita de maneira seccionada como: a energia utilizada

para serviços de manutenção ao longo da sua vida útil; e a energia envolvida na utilização de diferentes materiais utilizados na fase de construção do edifício. Nesta divisão, a fase de construção foi categorizada como: a energia consumida na produção de materiais básicos de construção; energia necessária para o transporte dos materiais até o local de produção; e a energia necessária para a montagem dos vários materiais na construção do edifício.

Diversos autores abordam de maneira mais ou menos completa a questão da influência da energia nos empreendimentos e as relacionam com algum potencial de impacto. Mais comumente, no âmbito da construção civil, o parâmetro de impacto adotado é a emissão de CO_2 e sua relação com o efeito no aquecimento global. Embora não seja consenso a inclusão do consumo de energia relacionado com a fase de demolição como um fator importante no ciclo de vida da construção, estes são inclusos em alguns estudos. Contudo, na maioria destes é apontada a importância da energia contida nos materiais e nos processos de construção como significativo, associados a energia demandada nas fases de serviço e manutenção.

Uma pesquisa de referência para consideração metodológica no levantamento energético para edificações foi realizada no campus da Universidade de Michigan por Scheuer et al. (2003). Nesta, foi realizada um estudo de caso que envolveu o ciclo de vida de um edifício universitário com uma área de 7.300 m^2 e com um horizonte de vida útil projetada para 75 anos. Foram inventariados os materiais considerando também alguma reposição durante os vários estágios de desenvolvimento do produto. Este inventário incluiu: a estrutura, as fachadas, os acabamentos interiores e sistemas sanitários. Como fases do ciclo foram admitidas: produção de materiais; transporte ao local de construção; fase de serviços de construção e demolição.

A importância deste trabalho reside no fato que questionou estudos anteriores de ciclo de vida para edifícios, realizados com base apenas na identificação parcial dos encargos ambientais, e guiados por informações generalizadas a partir dos estudos de banco de dados históricos do empreendimento. A análise mais abrangente de ciclo de vida considerando a construção de um edifício moderno, no campus da Universidade de Michigan, permitiu não só uma comparação com os resultados obtidos no presente trabalho, como também, contribuiu nas estimativas preliminares energéticas na construção da edificação objeto do estudo de caso, no campus da UFBA. Haja visto que, orientou abordagens na análise parcial para determinação das primeiras intervenções e/ou abordagens na análise de resultados e dos dados gerados preliminares. O resultado estimado de energia primária consumida pelo projeto consolidado e já executado na Universidade de Michigan, considerando todo o ciclo foi de 2,3 x 10^6 GJ o que equivaleu à taxa de 316 GJ/m2 do empreendimento. A produção e transporte de materiais em conjunto com a construção representaram 2,2% do consumo total de energia primária, enquanto 94,4% foi atribuída ao consumo de eletricidade do conjunto de ventilação artificial e condicionamento de ar ao longo da sua vida útil.

Destes resultados extraem-se que a climatização representa uma grande demanda energética, principalmente quando considerada a vida útil de funcionamento da edificação. Serviços de água representaram 3,3% da fase total e a etapa de demolição apenas cerca de 0,1% do total. Como conclusão, foi observado que a distribuição do consumo de energia e impactos ambientais foram concentrados na fase de utilização do edifício, e em todas as classificações, exceto na geração de resíduos, a fase de operação foi responsável por mais de 83% dos impactos ambientais inventariados. Esta compreensão remete ao fato que a atenção a concepção arquitetônica das edificações deve ser enfatizada. Melhorias no envelope (fachadas) podem reduzir substancialmente o consumo de energia e os impactos. As especificações de materiais menos energéticos e com menor massa térmica, associados ao aproveitamento dos fluxos de ar naturais, podem trazer grandes benefícios ao conjunto dos resultados energéticos e de impacto. A substituição na geração de energia para abastecimento dos sistemas de ar condicionado, aquecimento e ventilação artificiais por fontes mais limpas, reduzem o impacto ambiental em maior proporção uma vez que estes fatores representaram o maior impacto.

Outro estudo que amplia as considerações de impacto e energia nos levantamentos associados ao ciclo de vida dos edifícios da autoria de Li (2006, p.1414-1422), que propôs a divisão de avaliação de impacto em duas categorias: encargos locais e encargos contidos no edifício. Os encargos locais são aqueles considerados dentro da região onde a construção é realizada, enquanto que encargos contidos no presente caso, refere-se aos impactos da expansão da infra-estrutura necessária para operar o edifício, como estradas e vias de acesso, estacionamentos e etc. Este estudo realiza uma crítica as pesquisas anteriores de ACV, destacando que na maioria deles, o dano ou encargo ambiental não é tratado de maneira setorizada. Baseia-se no impacto geral causado ao meio ambiente, no entanto, a parcela de impacto local relacionados com o edifício não é estimado. Consideram a quantificação do impacto ambiental associado ao próprio edifício em si, no entanto, os encargos ambientais associados com a infra-estrutura necessária para a operação do edifício, a exemplo de estradas de acesso e estacionamentos, são desprezados. Outro ponto importante de crítica presente neste trabalho de Li, é que o foco nas discussões sobre a redução dos impactos associados com edifícios se concentram principalmente sobre a extensão da vida útil do edifício (durabilidade), o uso de materiais reciclados, e escolha para sistemas com baixo consumo de energia e baixo índice de poluição, deixando de lado a importante consideração dos impactos associados com o local e a forma de construção estrutural.

A questão proposta neste presente trabalho indica a necessidade de uma abordagem ampla, contudo de factível aplicabilidade na consideração de vários aspectos e singularidades relacionadas com a construção de uma edificação. Caso haja uma avaliação metodológica rasa, haverá possivelmente uma subestimação do impacto ambiental associado com edifícios, e uma falha na informação e na produção de dados úteis no apoio

às medidas para proteger o meio ambiente regional e planejamento urbano.

No Brasil, ainda que de modo mais modesto, a preocupação sobre a oferta e o consumo de energia associado com a indústria construtiva pode ser observado em alguns estudos. Alguns trabalhos realizaram comparativos do potencial de aquecimento global, analisando simulações para diferentes cenários de uma edificação, a exemplo de Nakao (2010). Outras pautaram sua análise concentrada na influência das variáveis construtivas e da utilização de equipamentos na ocupação, de acordo com Nascimento (2009). Trabalhos com a concentração na área de desenvolvimento de ferramentas computacionais como auxílio a análise de ciclo de vida também foram desenvolvidos a exemplo de Rodrigues et al. (2008). Este movimento demonstra que ainda que de forma incipiente e embrionária, há de fato uma atenção voltada para as questões de concepção de empreendimentos de construção com foco na sustentabilidade. As questões do setor construtivo sobre o aspecto energético também foram investigadas a exemplo de Lomardo e Rosa (2004, p. 89-95), que discutiram a falta de planejamento energético no país e a importância da legislação específica e práticas para melhorar o setor da construção e, portanto, obter edifícios com maior eficiência energética. Ordenes et al. (207, p. 629-642), analisaram a integração da energia fotovoltaica para uso em projetos de construção comentando sobre a contribuição desta fonte de energia para a preservação dos recursos naturais. Neste referido estudo, os autores demonstraram a viabilidade da aplicação fotovoltaica para países de baixa latitude, como o Brasil, e desta forma, caracterizando a vertente na utilização também de energias renováveis e sua maior representação no setor construtivo.

No entanto, devido principalmente ao fato de que não existe praticamente nenhuma base de dados sobre o consumo de energia e de encargos ambientais relacionados com materiais e com processos dentro da atividade de construção, associados a falta de conhecimento profissional sobre este assunto, há apenas poucas experiências sobre os dados de avaliação que poderiam contribuir para a concepção de construções melhores e mais sustentáveis. Neste contexto, uma melhor compreensão das tecnologias limpas e métodos de ACV pode contribuir para melhoria do cenário energético envolvido na construção civil. A produção de informação qualitativa e quantitativa que embasassem as decisões antes do processo de construção (fase de concepção do produto), ou mesmo durante o processo construtivo, permitindo que houvessem interferências e melhorias. Este conhecimento é primordial para o auxílio na tomada de decisões estratégicas pelos gestores, empresários, e fornecedores de matérias-primas relacionadas com a atividade de construção, proporcionando benefícios para a sociedade como um todo.

3 I METODOLOGIA

Conforme é preconizado nos estudos em ACV, foi definida a unidade funcional de análise global para o empreendimento levando em consideração os seus fluxos de

referência, que incluem, as quantidades necessárias de um produto para satisfazer uma certa função. A unidade funcional adotada foi portanto, o metro quadrado (m^2) de área construída do empreendimento em estudo. Foi então delineado o escopo inicial do trabalho e definido primariamente os limites de abordagem que nortearam a condução para esta análise. Cabe ressaltar que uma análise de ACV é dinâmica e portanto, o escopo de aplicação não se comportou estaticamente durante este trabalho. Este escopo foi ajustado para acomodar as diversas variáveis no que diz respeito à estimativas de ACV aplicados ao edifício. Os objetivos foram delineados como etapas de trabalho, e para cada etapa cumprida, nova consideração de avaliação foi produzida em função dos resultados obtidos, que em diversas ocasiões sugeriu uma reavaliação do escopo original. A figura 3 ilustra a concepção do diagrama modelo de pesquisa utilizado. São muitas as interações entre os levantamentos de energia envolvidos na extração de matérias-primas, bem como dos materiais e processos de produção, e a análise de ACV foi utilizada isoladamente para cada fluxo considerado de materiais e também utilizada de forma combinada quando da avaliação dos fluxos de processos, através da utilização de ferramentas desenvolvidas para auxiliar no inventário. Assim, a criação e definição de "pontos de corte" são necessários para avaliar a viabilidade e praticidade nestes levantamentos. Estes pontos são fornecidos e descritos na literatura a fim de adaptar as pesquisas para a realidade de cada trabalho, e permitindo ao descrever os processos de coleta de dados, a clareza quando da comparação com os dados a partir de fontes diferentes. Deste modo, conforme descrito na normatização de estudos de ACV, a confecção das bases de dados foi cuidadosamente documentada.

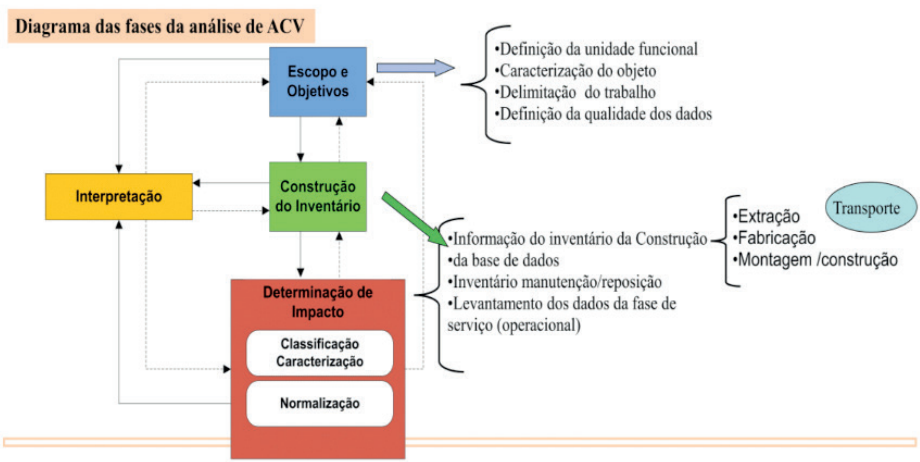


Fig. 3 Diagrama modelo de pesquisa

Fonte: Elaboração própria 2014.

O passo seguinte consistiu na definição do escopo do sistema estrutural para a caracterização do objeto de estudo e do grau de definição e abordagem para o trabalho, seguido da determinação da qualidade dos dados. A base para a realização do inventário foi então moldada, onde a entrada e saída dos fluxos de materiais e de energia foram classificadas pautados no conhecimento das quantidades utilizadas no projeto e da energia incorporada para os vários materiais e processos a serem utilizados na construção. Foram consideradas duas hipóteses de solução construtiva para possibilitar a comparação. O objetivo foi de prover à metodologia, a possibilidade de simulação de diferentes alternativas para a construção de edifícios e também de simular a sua utilização posterior a construção, gerando portanto neste caso, dois inventários diferentes. A intenção principal de efetuar a análise utilizando dois modelos foi observar o comportamento dos dois sistemas construtivos, aumentando assim a sensibilidade na apreciação dos dados. Isso também permitiria a observação das interferências necessárias ao projeto. Os dois modelos de concepção e desenvolvimento dos cenários foram nomeados: Construção Básica (CB) e Construção Energeticamente Eficiente (CEE).

O empreendimento realizado que foi o objeto de estudo de caso, consiste em uma edificação com área total construída de 1.760 m². Dividida em: um pavimento térreo, três pavimentos que serão utilizados como multi-laboratórios, e um pavimento de cobertura também integrado ao conjunto que servirá como área para experimentos com energias renováveis (vide figura 4), este empreendimento encontra-se localizado no campus Ondina da universidade Federal da Bahia.



Fig. 4 Perspectiva da edificação CEE

Fonte: Projeto base CIEnAm 2009

Para a escolha do local da edificação foram levados em consideração alguns fatores que estão diretamente conectados com a aplicação da análise de ciclo de vida visando o menor impacto e a maior integração com o ambiente. A proximidade das unidades de Física, Química, Geociências e PAF, a facilidade de acesso rápido a Politécnica e a unidade de Arquitetura, associada a facilidade de acesso ao exterior do campus. Além destes aspectos, a integração harmônica com as áreas de circulação e praças de acesso, estudadas e planejadas quanto a capacidade de fluxo, contribuíram para a não construção de novas vias de acesso para veículos. Além desta razão, a topografia praticamente plana do terreno favorecia a sua construção, enquanto evitava a necessidade de grandes movimentações de terra, o que implicaria em maior número de horas de máquinas trabalhando e consequentemente maior gasto energético e maior impacto ambiental associado. O posicionamento e a volumetria da edificação ao longo da encosta preservaram a vegetação natural e atribuiu à mesma um melhor aproveitamento das correntes de ar, bem como as fachadas principais, orientadas para o sudoeste, permitiram uma menor absorção quando da incidência solar e menor acúmulo de calor sobre a massa térmica do empreendimento. (vide figura 5).



Fig. 5 Edificação concluída

Fonte: Google Earth Inc./ registro próprio 2017.

As expectativas das múltiplas atividades que poderão constituir o edifício exigem em primeiro lugar, a concepção de edificações flexíveis quanto ao uso, cujos espaços internos sejam amplos o suficiente para favorecer adaptações e modificações ao logo do tempo. Em planta, a edificação foi dividida em duas seções com área aproximada de 150 m^2, interligadas entre si pela escada e área de circulação com sanitários e serviços. O andar térreo foi destinado, em geral, para uso dos estudantes, com possibilidade de eventos e exposições abertas. Os três andares superiores, destinados a atividades diversas,

foram projetados com quatro salões de 75 m^2 cada, que podem ser subdivididos em salas menores ou anexados por setor de 150 m^2, se assim for necessário. Vãos livres foram priorizados na confecção da estrutura de forma a transmitir leveza e mobilidade ao projeto. A cobertura, que sofreu isolamento térmico e foi impermeabilizada, seguiu os mesmos princípios dos andares inferiores, permitindo a colocação futura de equipamentos diversos para monitoramento do meio ambiente e auto-sustentabilidade da edificação.

O cenário **CB** reproduz a replica do projeto de sua implementação tal como definido pelo padrão encontrado nos edifícios existentes no campus, que incluem: projeto de fachada, especificações de materiais, sistemas operacionais e bases estruturais, semelhantes ao projeto inicial e similares em suas características. O cenário **CEE** reflete a execução do projeto através da consideração de seu design e características de construção relacionados com a produção mais limpa e análise do ciclo de vida, visando a realização de um edifício energeticamente mais eficientes e, portanto, menos prejudicial ao meio ambiente. Para definir uma linha de base para a realização de comparações entre o **CB** e a **CEE**, ambos os edifícios tiveram que ser semelhantes. É necessário para efeito comparativo coerente que os mesmos objetos de estudo, no caso a construção do edifício laboratório, tenham as mesmas características de funcionalidade e finalidade. Isto significa portanto, que devem ser iguais em área, proporcionando a utilização do mesmo tipo de serviço em termos de qualidade e quantidade.

A concepção arquitetônica escolhida para a CEE também constitui outro fator importante que influencia no resultado final de impacto ambiental. Enquanto mantém a funcionalidade equivalente a CB, provê melhorias no aproveitamento da iluminação e ventilação natural; melhor fluxo de ar quente através do edifício; diminuição no acúmulo de calor através da massa térmica do empreendimento; mudanças nas especificações dos materiais por materiais com menos encargos energéticos e de maior durabilidade; eliminação de processos e de materiais na construção; aproveitamento dos serviços de água através de ferramentas de re-uso e de gestão do recurso; redução no consumo energético do empreendimento através da não utilização de climatização artificial e equipamentos de iluminação mais energeticamente eficientes. Este conjunto de fatores pôde atribuir a CEE uma eficiência energética maior em relação à CB ao longo do ciclo de vida do empreendimento.

Na fase preliminar foram avaliados os encargos energéticos contidos nos materiais e nos processos construtivos através do uso de alguns softwares específicos e seus respectivos bancos de dados disponíveis, além de consulta a outros bancos de dados de materiais e processos na literatura, a exemplo dos softwares ECOINVENT v 2.1 (2009) e do SIMaPRO v.7.01, (2008). Consideraram-se as etapas de extração, transporte da matéria-prima e fabricação materiais, sua respectiva mobilização e transportes necessários até o local da construção, e sua montagem (processo de construção). Estes encargos foram acessados de acordo com os dados obtidos a partir de empresas de construção e

com a consideração de dados com base na literatura, sendo também incluso os fluxos de materiais e de energia considerando a etapa de manutenção e substituição de materiais durante a vida útil do projeto.

Num segundo passo, foi considerada a energia contida na fase operacional do projeto, levando em conta o consumo de energia primária de acordo com os serviços previstos prestados pela edificação quando da sua operação. A utilização de equipamentos, e dos sistemas básicos de funcionamento e operação da infra-estrutura fizeram parte desta etapa da análise. A última fase da análise dos dados resultou na construção de um novo relatório, incorporando novos dados ao deficitário banco de dados energéticos brasileiro para materiais e processos de construção, e contribuindo para o fomento pela cultura e prática deste tipo de metodologia de análise. Os dados encontrados foram ajustados para os dois modelos de construção propostos e comparados com bases de dados da literatura. Após a análise e purificação destes dados, o passo seguinte foi a consideração e totalização da energia para o evento de avaliação e projeção de impacto construtivo com base apenas no potencial de aquecimento global associado com o consumo de energia. A partir da análise global preliminar, e das considerações dos resultados preliminares relativos aos bancos de dados de energia e inventários da energia contida nos diversos processos, foi realizada uma primeira etapa de intervenções tanto na concepção do projeto, quanto nas diretrizes metodológicas da análise. Estas intervenções foram positivas para a compreensão da importância no conhecimento dos aspectos locais na consideração da energia que envolvem a construção, no sentido de que os bancos de dados existentes muitas vezes não refletem a realidade brasileira, uma vez que são baseados principalmente em dados da literatura estrangeira. Essa percepção foi importante na tomada de decisões e planejamento de construção, bem como na assistência ao processo de fazer os bancos de dados próprios e da metodologia final da pesquisa.

É importante o destaque que, os dados principais para o trabalho de avaliação de impacto consideraram as questões relacionadas com a energia total incorporada no empreendimento. A metodologia de levantamento energético sugerida considerou várias abordagens presentes na literatura. A abordagem geral de todo o ciclo do objeto de estudo de caso foi realizada considerando a extração de recursos, a fabricação, construção e utilização, como descrito em alguns estudos na literatura, e considerou também o transporte de materiais envolvidos nas várias fases do ciclo, o que não é prática na maioria dos estudos considerados e relatados. A peculiaridade desta metodologia de estudo deveu-se ao fato que, como o objeto de estudo encontrava-se precisamente na fase de planejamento executivo, a metodologia de levantamento energético pôde ser validada passo a passo durante a construção do projeto, e pôde também sofrer interferências com o seu próprio curso, proporcionando melhorias para o processo final de construção além de torná-la uma ferramenta útil para orientar o aperfeiçoamento do projeto, de acordo com as avaliações de suas interações com o processo de construção. A escolha do local de implantação do

empreendimento também foi relevante para os resultados obtidos. O posicionamento do edifício, bem como sua orientação visaram o menor impacto e uma melhor integração com o meio ambiente. A proximidade das edificações funcionais existentes, juntamente com a facilidade de acesso para o exterior do campus, proporcionou uma integração harmoniosa. Isso contribuiu para evitar a construção de novas vias de acesso para os veículos, o que causariam maiores impactos relacionados à infra-estrutura local, como relatado por Li (2006). Além destas razões, a escolha pela implantação em local específico evitou a necessidade de grandes obras envolvendo cortes e/ou aterros e reduzindo o impacto ambiental gerado. A disposição e o desenho do projeto proporcionou uma melhoria na utilização de correntes de ar, o que reduziu também a temperatura ambiente interna.

A fachada principal, orientada para o sudoeste, permitiu uma menor absorção da luz solar e acúmulo de menor calor sobre a massa térmica do edifício. O projeto arquitetônico escolhido para o **CEE** também é outro fator importante que influenciou os resultados energéticos. Enquanto se mantém a funcionalidade equivalente a **CB**, proporciona a melhoria na utilização de dispositivos de iluminação natural e de ventilação com um melhor fluxo de saída do ar quente através do edifício. Estas premissas de projeto definidas em função do conhecimento adquirido nos estudos preliminares aplicados através da metodologia inicial proposta, levaram à mudanças nas especificações de materiais proporcionando menores custos de energia e maior durabilidade. A eliminação de processos e materiais na construção, o uso de serviços de água através de ferramentas de reutilização e gestão de recursos naturais, foram também elementos que contribuíram para a obtenção dos resultados. As simulações realizadas indicaram a possibilidade substancial na redução no consumo de energia através da minimização do condicionamento de ar e do uso de equipamentos de iluminação artificial mais eficiente em termos energéticos. Estes fatores atribuíram a **CEE** eficiência energética superior em relação ao **CB** ao longo do ciclo de vida do empreendimento. Uma comparação das características de ambas as hipóteses de construção pode ser observada na Tabela 1.

Sistema Construtivo	Características específicas (CB)	Características específicas (CEE)
Fundações	Cravação de estacas metálicas	Cravação de estacas protendidas em concreto
Superestrutura	Em concreto armado fck 30 MPa	Em concreto armado fck 30 MPa
Paredes externas	Em bloco cerâmico	Em bloco de cimento e combogos em cimento
Paredes internas	Em bloco cerâmico com trechos em combogo cerâmico	Em bloco de cimento com trechos em combogo de cimento
Janelas	Em alumínio nas fachadas frontal e posterior	Em breze em alumínio no vão de escada e alumínio na fachada posterior
Portas	Em madeira	Em madeira

Cobertura/telhado	Laje de cobertura impermeabilizada com pavimentação em cerâmica	Laje de cobertura impermeabilizada com pavimentação em piso de alta resistência
Pavimentação	Piso cerâmico tipo lajota	Piso em alta resistência e cerâmico nos sanitários
Revestimento Interno	Massa única com acabamento em pintura acrílica sobre massa corrida em todas as paredes; nos sanitários massa única com acabamento em cerâmica colada sobre a massa única.	Cerâmica colada sobre massa única somente com nos sanitários; nas demais paredes azulejo biscoito fino h: 1,50m aplicado direto sobre o bloco e acima de 1,50m pintura texturizada aplicada direto sobre o bloco.
Revestimento Externo	Massa única com acabamento em pintura acrílica sobre massa acrílica	Tinta acrílica sobre os elementos estruturais; textura aplicada diretamente sobre os blocos
Controles elétricos Iluminação /lógica	Controles elétricos manuais; medição de entrada única; luminárias padrão conforme projeto; instalações de lógica cabeadas; utilização de climatização artificial.	Controles elétricos manuais; medição individual por laboratório; luminárias de alta eficiência conforme projeto, instalações de lógica cabeadas, climatização natural.
Controles hidráulico	Controle manual; rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial.	Controle manual com válvulas temporizadas de fluxo, rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial; aproveitamento pluvial através de captação na cobertura.
Eletricidade	100% de fornecimento da concessionária local	Controle manual com válvulas temporizadas de fluxo, rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial; aproveitamento pluvial através de captação na cobertura.
Água potável	100 % de fornecimento da concessionária local	100 % de fornecimento da concessionária local
Rede de coleta	Disposição Oceânica	Disposição Oceânica

Tabela 1: Características de construção para (CB) e (CEE)

Fonte: Construção do Autor 2017.

No que tange aos limites da pesquisa e seu “ponto de corte”, os processos avaliados nas etapas de análise distribuídos foram: extração de matérias-primas e produção de materiais de construção básicos (por exemplo, areia, água, agregado miúdo e graúdo, blocos, madeira, cimento , aço, etc.); fabricação de elementos e componentes para a construção (madeira e estruturas de alumínio, vidro, cerâmica, tintas, concreto, etc.); transporte de matérias-primas para a fabricação e transporte de tais materiais para o local de construção; construção do objeto do estudo; consumo de energia durante a fase de utilização (demanda de serviços) do empreendimento, e a energia contida nos materiais e procedimentos de manutenção.

Os limites de análise de energia foram estabelecidos de acordo com os dados mais

representativos da energia primária no inventário e seguindo a normatização para ACV e muitos elementos de baixa contribuição em energia foram excluídas da pesquisa.

O "ponto de corte" adotado para cada banco de dados foi estabelecido de acordo com a disposição no encontro de dados válidos e de relevância. A pesquisa constatou a necessidade de uma avaliação mais aprofundada dos dados obtidos para possível contribuição qualitativa que poderia oferecer, de acordo com a ISO 14040 (1997) e ISO 14041(1997) para aplicações de ACV para construção civil. A maioria dos dados preliminares foram obtidos do banco de dados DEAM, ECOBILAN (2007), e Ecoinvent v.2.01(2009), SIMaPRO v.7.01, (2008). As quantidades de materiais, que possibilitaram o levantamento de massa e posteriormente o de energia, foram definidas com base nas informações geradas pela planilha de orçamento do projeto. Estas informações geradas por planilha foram posteriormente corrigidas por meio de faturas de materiais fornecidos pelos levantamentos dos fabricantes e de campo, de forma a conferir uma maior precisão ao levantamento. As bases de dados brasileiras de energia foram obtidas a partir de levantamentos de campo e bancos de dados de fabricantes locais.

Após as primeiras análises realizadas seguindo o escopo da metodologia, e da consideração dos materiais especificados inicialmente na construção do projeto, algumas mudanças foram adotadas a fim de não só reduzir custos, mas também objetivando a redução do encargo energético associado ao projeto. Alterações também foram atribuídas à envoltória do edifício e ao sistema operacional de serviço com o mesmo objetivo. As principais alterações relacionadas com a especificação no aspecto da análise do ciclo de vida objetivaram: a eliminação de processos de serviço e a substituição de materiais com maior carga energética contida, por materiais que contribuem para esta redução, e a utilização de materiais com maior durabilidade. Este constituiu fator positivo durante a fase avaliada de manutenção e/ou substituição. No que concerne às interferência providas nas fachadas (envelope) do edifício, foram aumentadas as áreas de iluminação e de ventilação natural, de modo a reduzir a necessidade para o condicionamento de ar e iluminação artificial. Outra interferência na envoltória do edifício foi a eliminação do revestimento de argamassa em toda a fachada e que se estendeu as áreas internas, o que reduziu processos, economizou energia, e consequentemente, contribui positivamente na redução no impacto ambiental global do empreendimento. Foram realizadas intervenções também na fase de serviço: a eliminação da climatização artificial, e a utilização de equipamentos de iluminação mais eficientes, associado ao aumento da iluminação natural.

4 I RESULTADOS E ANÁLISES

As figuras 6 e 7 ilustram respectivamente os resultados comparativos de consumo de energia de alguns materiais básicos relevantes utilizados durante a fase de construção e os resultados comparativos de consumo total de energia incorporada. Em relação ao

ciclo de vida, pode-se notar que na fase de construção, o cenário **CEE** resultou numa redução significativa no consumo de energia (47,62%), incluindo a extração de matérias-primas. As economias de energia principais durante a fase de construção foram devido a mudanças nos materiais de fundação (economia de 2.068.479 MJ), alterações do material das paredes (economia nos blocos de 576.028 MJ), reduzindo o uso de vidro e alumínio (respectivamente; 9.708.186 MJ e 353.655 MJ); eliminações de revestimento interior e exterior, o que reduziu processos e materiais como: cal, areia, cimento, representando 143.524 MJ; 7.791 MJ e 247.654 MJ, respectivamente.

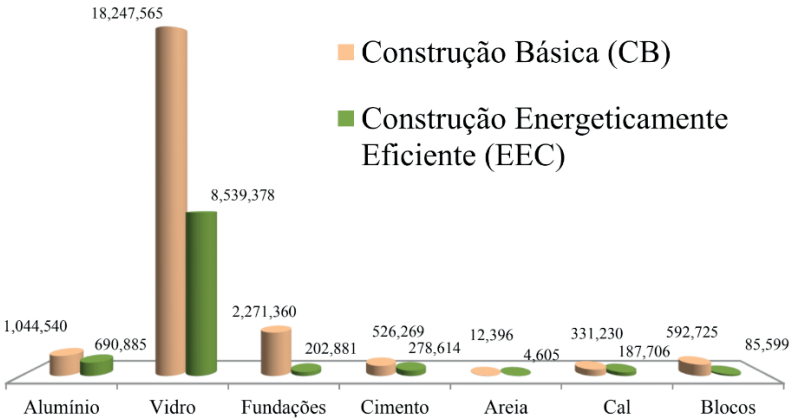


Fig. 6 Comparação energética dos materiais básicos principais

Fonte: Construção do Autor 2017.

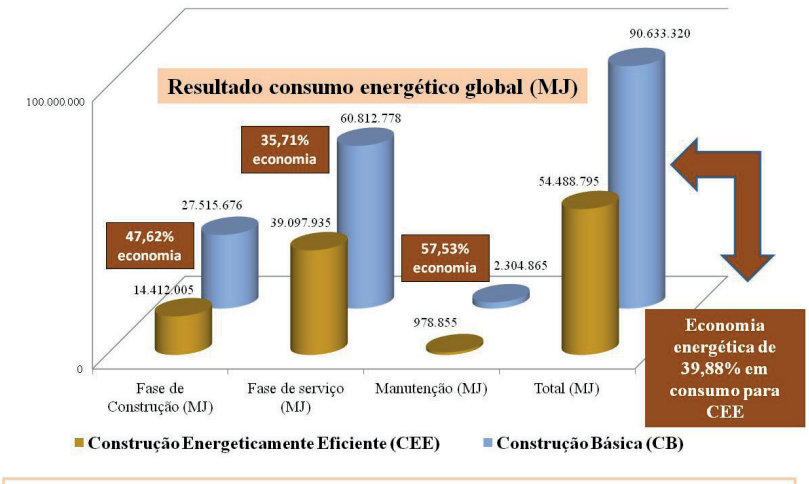


Fig. 7 Resultado do consumo energético Global (MJ)

Fonte: Construção do Autor 2017.

A economia no consumo de energia na fase de serviço calculada para o cenário **CEE** foi de aproximadamente 35,71% da energia total consumida para **CB** ao longo do seu horizonte projetado de vida útil. Os resultados individualizados são mostrados por seção de serviço na tabela 2.

Descrição	Consumo de energia (CB) kWh	% Rel. Total	Consumo de Energia (CEE) kWh	% Rel. Total
Iluminação	1.474.704	8,73	1.179.763	10,86
Climatização	5.736.960	33,96	0	0,00
Informática	3.978.374	23,55	3.978.374	36,63
Equipamentos	5.702.400	33,76	5.702.400	52,51
	16.892.438	**100%**	**10.860.538**	**100%**

Tabela 2. Comparação energética na fase de serviço

Fonte: Construção do Autor 2017

Os resultados do inventário de energia para os procedimentos de manutenção de rotina, conforme estabelecido na base de dados de fabricantes e na literatura, apontam para um consumo de 2.304.865 MJ para **CB**, que é equivalente a cerca de 640.240 kWh, e de 978.854 MJ para **CEE**, o equivalente a 271.904 kWh. Isso significa 57,5% menos energia que seria necessária para a manutenção e reparação da unidade construída como **CEE** em relação ao cenário **CB**. Vale ressaltar que, como afirma o levantamento de dados, se menos energia e materiais mais duráveis são utilizados na construção, maior será a economia de energia ao longo dos anos. Embora num primeiro momento, a ideia geral é que ser sustentável pode resultar em um aumento dos custos de construção em geral, isso não é verdade absoluta. Para verificar a relação custo/sustentabilidade foram calculados os custos do projeto dividido em: custos de construção, custos de manutenção e custo no consumo de energia durante a fase de serviço. Os resultados são apresentados na figura 8 em valores indexados pelo dólar americano.

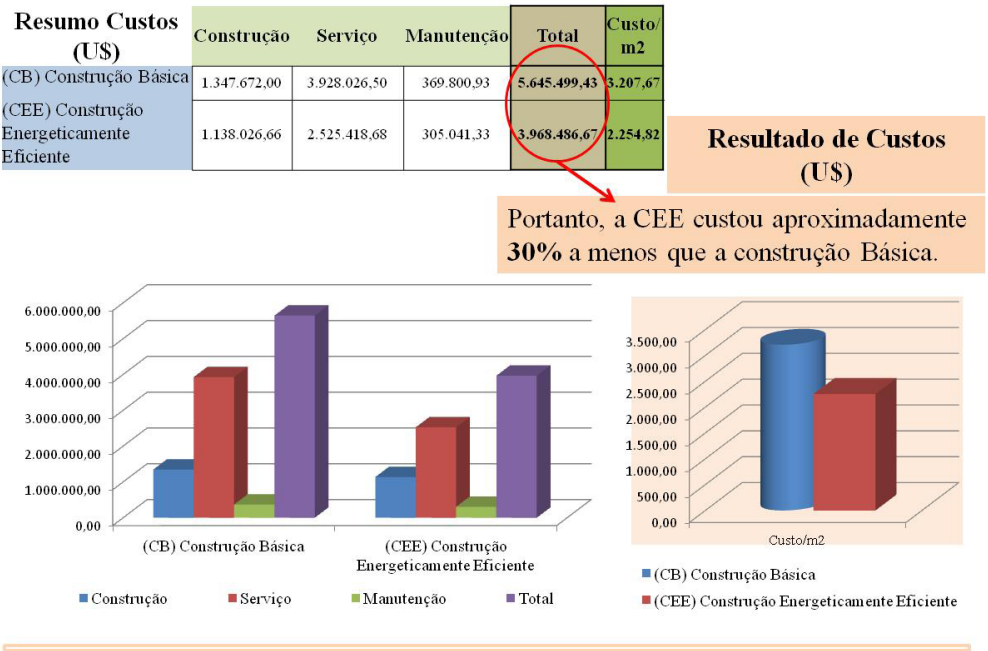


Fig. 8 Resultado de avaliação dos custos (U$)

Fonte: Construção do Autor 2017

A economia global para **CEE** apresentada foi de 29,71% nos custos Globais. O valor em U$/m² para as duas hipóteses foram, respectivamente, para o **CB** e **CEE**, U$ 3.207,67/m² e U$ 2.254,82/m², constituindo índices de custos para avaliação e comparação, considerando um horizonte de vida útil projetado para 75 anos. Os resultados finais obtidos permitiram a construção de índices de consumo de energia por metro quadrado para o projeto considerado como um estudo de caso. Para a hipótese construtiva básica (**CB**), a taxa de energia contida por metro quadrado foi de 51,5 GJ/m², enquanto que para (**CEE**) foi 30,96 GJ/m². Devido a esta redução no consumo energético e com base na configuração da matriz energética brasileira estimou-se que a construção energeticamente eficiente emitiu aproximadamente **39,88% menos de Carbono**, o que representa menos impacto ambiental relacionado ao potencial de aquecimento global conforme pode ser observado na figura 9.

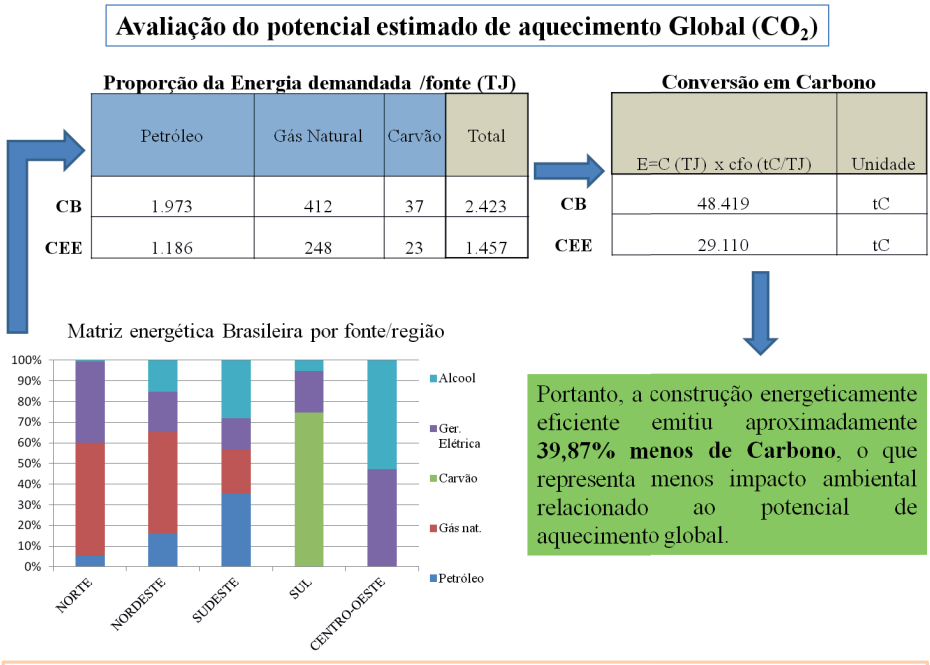


Fig. 9 Resultados de emissão de carbono equivalente

Fonte: Construção do Autor 2017

A geração de um índice de consumo de energia por metro quadrado de área construída é de fundamental importância por vários aspectos, tais como consumo de energia e impacto ambiental. A contabilização dos custos de energia pode ser relacionada com o custo projetado final de construção. Podem ser feitas comparações com outras formas de empreendimento e o resultado pode ser usado como uma ferramenta de gestão. As projeções de consumo de energia em escala podem ser mais precisas a partir desta metodologia. O sector da construção é uma mola mestre da economia e a oferta de energia e uma preocupação constante em qualquer economia. Informações resumidas por índices de consumo de energia podem ser relacionadas a questões socioeconômicas.

No estudo realizado por Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064) da Universidade de Michigan campus, a fase que compreende os serviços de água e a substituição de materiais utilizou cerca de 97,7% do total da energia gasta durante a construção. O transporte de materiais representou 2,2%. Neste presente trabalho realizado no campus da UFBA, a fase de serviço representou 73,55% da energia contemplando a substituição dos materiais ao longo da sua vida útil. A fase de construção, produção e transporte de materiais representaram 26,45% do total de energia durante a vida útil do projeto. Este fato pode ser explicado pela maior demanda de energia para aquecimento e arrefecimento do edifício da Universidade de Michigan, que representou os maiores percentuais de impacto ambiental

associado ao consumo de energia, principalmente devido a grandes variações térmicas. Por isso, é provável que, para países localizados em zonas climáticas com estações mais regulares, baixas flutuações na temperatura, e clima mais ameno, as diferenças no consumo de energia entre estas duas fases tendam a ser mais baixas.

A intervenção sobre o resultado da eficiência energética na fase de serviço está diretamente relacionada à concepção do projeto, design e funcionalidade para o fim a que este esta designado. Assim, uma boa especificação de materiais e adequadas decisões tomadas na fase de projeto, podem trazer ganhos significativos na redução na demanda de energia durante a vida útil do projeto. Esta condição é também corroborada pelo trabalho de Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064).

A escolha de não execução das vias de acesso para atender o edifício construído no laboratório do campus da universidade contribuiu para a redução, local e globalmente, a geração de encargos. A consideração mencionada ainda no planejamento do projeto, possibilitou a escolha do local para implantação do edifício e a integração à estrutura já existente de estradas de acesso no campus. A influência deste fator foi medida na obra de Li (2006, p. 1414-1422), onde esta variável foi quantificada, juntamente com a interferência e as considerações em relação aos impactos locais durante a execução do projeto. Foi também destacado, e refletido neste presente trabalho, que é importante a escolha de materiais de construção e a incorporação na consideração de energia que é usada durante o transporte de materiais e recursos similares.

5 I CONCLUSÕES

Os resultados da aplicação da metodologia de ACV proposta para este estudo quando comparada à estudos anteriores envolvendo construção civil com a mesma abordagem, mostram que prevaleceu um consumo mais representativo na fase de serviço. Contudo, é possível verificar que principalmente relacionada a fase de serviço da edificação, os valores do consumo energético sofrem grande influência das zonas climáticas e das oscilações nas variações térmicas. Isto porque a curva de demanda energética aumenta significativamente com a utilização da climatização artificial. Quanto maiores as variações térmicas, maior será o encargo energético associado a regulagem da temperatura ambiente. Como é na fase de serviço que se dá o maior consumo energético, o foco na eficiência energética deve ser direcionado para a energia consumida durante a utilização do empreendimento, especialmente em edifícios onde o consumo de energia nesta fase referida é alto. A redução da ineficiência energética nesta fase, irá influenciar com maior alcance a contribuição relativa total dos custos de energia e ambientais, do que durante as fases de produção e construção, que são mais relacionados aos impactos locais. Embora esta análise não seja completa, pois excluiu-se a fase de demolição, a peculiaridade de ter sido desenvolvida durante o processo de construção, atribui um diferencial positivo em relação a outros

trabalhos de ACV global. A possibilidade de obtenção de inventário detalhado de materiais e processos com o construtor, inerentes ao controle da aplicação durante o desenvolvimento do trabalho, possibilitou uma maior precisão para os dados. Outro aspecto relevante deste trabalho foi a possibilidade de produção de bases de dados próprias de energia, contida nos materiais e processos, e que refletem a realidade brasileira. Esta contribuição é de fundamental importância no sentido de prover informação qualitativa e de ampliar o ainda deficitário banco de dados energéticos para materiais e processos de construção brasileiro.

O presente trabalho é uma contribuição para a indústria da construção, levantando questões sobre as suposições anteriores relacionadas com o comportamento real do setor no que diz respeito à sustentabilidade, haja visto que provou ser possível obter melhorias ambientais sem necessariamente implicar no aumento de custos. De forma contrária ao padrão de resultados esperados, conseguiu obter redução de custos ao passo que reduziu os impactos, demonstrando assim que é viável economicamente a aplicação de soluções mais sustentáveis para o setor. A sugestão de melhorias no controle e medição de consumo de energia relacionado a produtos e processos, através do desenvolvimento de metodologia de aplicação prática, proporcionou a possibilidade de utilização de ferramenta de análise que pode ser utilizada também como instrumento de gestão por parte do poder público em busca do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

DE CARVALHO. A. C. V.; GRANJA, A. D.; DA SILVA, V. G., **A Systematic Literature Review on Integrative Lean and Sustainability Synergies over a Building's Lifecycle.** Sustainability 2017, 9, 1156.

ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN - (AIJ): **Guidelines for LCA of buildings**. Maruzen Publishing Division, 2003. p. 7-33

BUCHANAN, A.; HONEY, B.: **Energy and carbon dioxide implications of buildings constructions**. Energy and Buildings 20 , 1994. p. 205-217

CALIFORNIA ENERGY COMISSION: **Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings**. Sacramento: California Energy Comission, 2001 p. 166

CASALS, X. G. **Analysis of building energy regulations and certification in Europe: Their role, limitations and differences**. In: Energy and Buildings, Oxford: Elsevier, 2006. v. 38,pp. 381-392.

CHAU, C. K.; BURNETT, J.; LEE, W. L. **Assessing the cost effectiveness of an environmental assessement scheme**. In: Bulding and Environment. Osford: Pergamon, 2000. v. 35, pp. 307-320.

DEBNATH A.; SINGH S. V.; SINGH Y. P. **Comparative assessment of energy requirements for different types of residential buildings in India**. Energy and Buildings 23, 1995. p. 141-146.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. **Re-use of construction and demolition waste in the EU**. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice., São Paulo, 2000. Proceedings. São Paulo, EPUSP, 2000.

EATON, K. J.; AMATTO, A. **A comparative life cycle Assessment of steel and concrete framed office buildings**. Journal of Constructions Steel. Research 46 (1-3), 1998 p. 286-287

ECOBILAN,P.;TEAM/DEAM; ECOBILAN. PriceWaterhouseCoopers, Bethesda, MD, 2007.

ECOINVENT v 2.1 Swiss Centre for life Cycle Inventory ISBN 3-905594-38-2, 2009

ERLANDSSON, M.; BORG, M. **Generic LCA-methodology applicable for building, construction and operation services-today practice and development needs.** Build and Environment 38 (7), 2003. p. 919-938

FURTADO, J. S. **Atitude ambiental sustentável na Construção Civil: ecobuilding e produção limpa**.
Disponível em:<http://www.vanzolini.org.br/areas/desenvolvimento/producaolimpa>. Acesso Julho, 21, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE- Diretoria de pesquisas, Coordenação de contas nacionais, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA. **Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector** - The 2019 Global Status Report for Buildings and Construction, 2019. ISBN No: 978-92-807-3768-4

ISO, ISO 14040. **Environmental management – Life cycle assessment- Principles and framework**. International Organization for Standardization, 1997.

ISO, ISO 14401. **Environment Management-Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis**. International Organization for Standardization, 1997.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM DE RESÍDUOS DOMICILIARES, São Paulo. Disponivel em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br> . Acesso Agosto, 2, 2003.

KIPERSTOK, A.; COELHO, A.; TORRES, E. A.; MEIRA, C.C.; BRADLEY, S. P.; ROSEN, M. **Prevenção da poluição**. Brasilia: SENAI/DN,2002.

KIRK, S. J.; DELL'ISOLA, A. J. **Life Cycle Costing for Design Professionals, second edition**. McGraw-hill, New York, 1995. p. xiii,262.

LI, Z. **A new life cycle impact assessment approach for buildings**. Building and Environment 41, 2006. p. 1414-1422.

LOMARDO, L. L. B.; Rosa L. P. **The Brazilian energy crisis and a study to support building efficiency legislation**. Energy and Buildings 36, 2004. p. 89-95

MARTINEZ, A. G., **Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de Edifícios: Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Vivendas en Andalucía**. 2010. 495p. Tese de Doutorado - Universidad de Sevilla/Chalmers University of Technology, Sevilla, 2010.

NAKAO, J. E. H. **Comparação do potencial de aquecimento global de um mesmo edifício em diferentes cenários**. In: 2º congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em produtos e Serviços... Anais. 2010. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: 2010.

NASCIMENTO, L. B. P. DO. **Influência de variáveis construtivas e de uso de equipamentos e ocupação no consumo de energia em edifícios de escritório localizado em Londrina-PR**. 2010

OKA T.; SUZUKI, M. ; KONNYA, T. **The estimation of energy consumption and amount of pollutants due to the construction of buildings**. Energy and buildings 19, 1993. p. 303-311.

ORDENES, M.; MARINOSKI, D. L.; BRAUN, P.; RUTHER, R. **The Impact of building-integrated photovoltaic on the energy demand of multi-family dwellings** in Brazil. Energy an d Buildings 39, 2007. P. 629-642.

PINTO, T.P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999, São Paulo. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1999, São Paulo.

PRe Consultants; SIMaPRO 7.01v, 2008

RODRIGUES, C. R. B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. L. **Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV)**. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção... Anais, p. 1-15, 2008.

SCHEUER C.; KEOLEIAN, GREGORY A;REPPE, P. **Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications**. Energy and Buildings 35, 2003. p. 1049-1064.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. I**nternational Energy Outlook** - **IEO 2019**. U.S Energy Information Administration, Washington, DC. September, 2019.

VENKATARAMA REDDY, B.V. ; JAGADISH K. S. **Embodied energy of common and alternative building materials and technologies**. Energy and Buildings 35 (2003) P.129-137. Accepted by 25 November (2001).

VERRIER, B.; ROSE, B.; CAILLAUD, E.; REMITA, H. **Combining organizational performance with sustainable development issues: The Lean and Green project benchmarking repository**. J. Clean. Prod. 2014, 85, 83–93.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT- WBCSD. **Eficiência energética em edifícios - Realidades empresariais e oportunidades**. Relatório síntese, edição portuguesa, WBCSD (2007)

CAPÍTULO 26

MONITORAÇÃO REMOTA DE RESERVATÓRIOS LÍQUIDOS UTILIZANDO O MÓDULO ESP32-LoRA

Data de aceite: 01/05/2021
Data de submissão: 01/03/2021

Maria Eduarda Aparecida Gil
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Birigui – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/0017583945307125

Thiago Timoteo Henrique
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Birigui – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/1712462795260260

Getúlio Teruo Tateoki
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Birigui – São Paulo
http://lattes.cnpq.br/1428002511987398

RESUMO: O objetivo deste projeto é a construção de um sistema de monitoração remota de reservatórios líquidos operando com o módulo microprocessador ESP32 com tecnologia de rádio frequência LoRa para análise de nível desses líquidos através da comunicação entre a programação do transmissor para o receptor. Este microprocessador atinge um alcance de 200m com um consumo de 50mW, que usa como alimentação baterias de lítio com meses de duração.
PALAVRAS - CHAVE: Microprocessador; tecnologia; transmissor; receptor; sistema.

REMOTE MONITORING OF LIQUID RESERVOIRS USING THE ESP32-LoRA MODULE

ABSTRACT: The objective of this project is to build a remote monitoring system of liquid reservoirs operating with the ESP32 microprocessor module with LoRa radio frequency technology for level analysis of these liquids through communication between the transmitter programming to the receiver. This microprocessor reaches a range of 200m with a consumption of 50mW, which uses lithium batteries with months of duration as power.
KEYWORDS: Microprocessor; technology; transmitter; receiver; system.

1 I INTRODUÇÃO

No mundo de hoje é inevitável não acompanhar os avanços na tecnologia. A monitoração remota, por sua vez, abrange diversas necessidades que em épocas passadas não se considerava a imensa facilidade de monitorar níveis de um reservatório sendo realizado em modo de longa distância em tempo real e com baixo consumo de energia.

Em consequência do aumento das necessidades da sociedade, os aparelhos de monitoração remota conectadas ao sistema de controle de processos favoreceu para melhoria em custos/benefícios e preferência de seu uso.

Com o desenvolvimento de micro controladores e de redes sem fio, os sistemas abordados também evoluíram, algumas delas já

engloba da tecnologia do módulo microprocessador ESP32-LoRa que permite comunicação a longa distância. Este equipamento é de baixo custo com um consumo de energia muito baixo de 50mW para sua execução.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado o módulo ESP32-LoRa para construção dos programas com um display transmissor e um receptor, ambos interligados nas saídas de dados de um notebook por meio de cabos USB conforme mostra a foto da Figura 1.

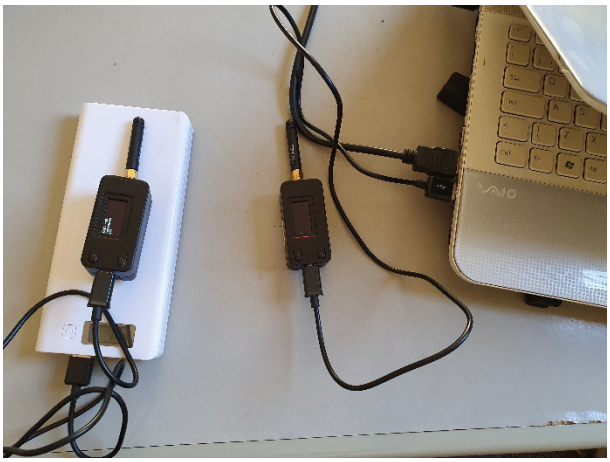


Figura 1. Módulo ESP32-LoRa para construção e elaboração de programas.

Por meio da comunicação de longa distância (LoRa) o transmissor capta os níveis do reservatório líquido através do sensor de nível emitindo para o receptor a informação necessária de nível deste liquido onde é mostrada em seu display LCD ou um computador através de uma conexão USB Serial. Opcionalmente este resultado poderá ser transmitido e recebido à um dispositivo móvel ou a um computador através de uma conexão Bluetooth já que o ESP32-LoRa também possui esta função interna agregada ao aparelho. A figura 2 mostra o esquema desse sistema.

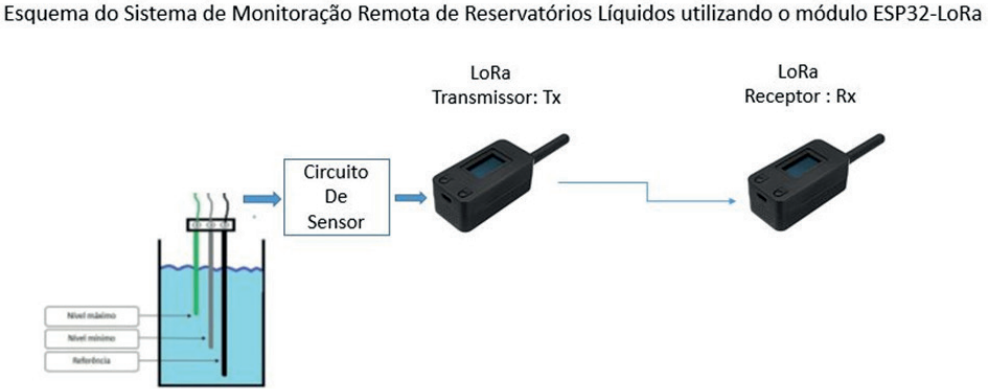


Figura 2: Esquema do Sistema de Monitoração Remota de Reservatórios Líquidos utilizando o módulo ESP32-LoRa.

O módulo sensor de nível foi confeccionado em uma placa pci a partir do Software ISIS/ARES Proteus cujo esquema elétrico é mostrado na Figura 3 e a placa montada bem como o sensor na foto da Figura 4.

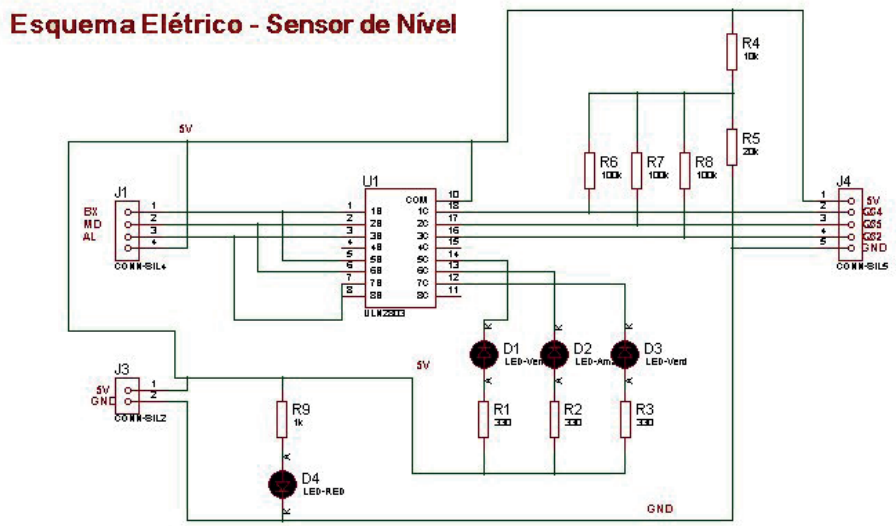


Figura 3 – Esquema Elétrico elaborado no software ISIS/ARES Proteus.



Figura 4 – Sensor e o módulo montados na placa pci.

O transmissor obteve adaptações para conectar-se ao sensor de nível, tornando possível realizar a identificação de nível do liquido através de uma ponteira com pinos elétricos imerso em um mini reservatório liquido. A foto da Figura 5 mostra o conjunto sensor/módulo já ligado ao módulo ESP32- LoRa.

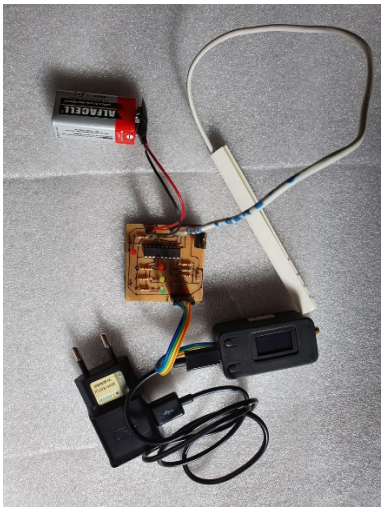


Figura 5 – Módulo sensor ligado ao ESP32-LoRa.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor desempenho do sinal, foi realizado testes de longa distância nos displays em campo aberto, sem possíveis interferências com um auxilio de medidor em metros, obtendo os 200 metros máximos de um sinal sendo que a distância segura é de 150 m pois não deverá ultrapassar a queda de -137dBm na intensidade de sinal como mostra o gráfico da Figura 6.

Para se obter um resultado efetivo, necessitou se de pesquisas e estudos iniciais do Arduino Uno, a familiarização com o módulo ESP32-LoRa usufruindo as suas vantagens e benefícios para aplicação de dois programas indispensáveis concedidos ao transmissor e receptor em comunicação ponta a ponta do projeto.

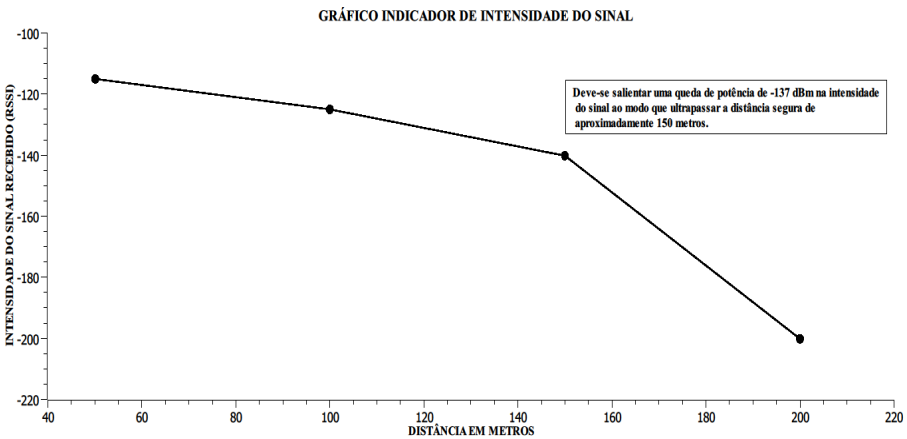


Figura 6: Gráfico indicador de intensidade do sinal dos displays transmissor e receptor.

4 | CONCLUSÕES

Com a realização deste projeto foi possível concluir que há possibilidade de implementar um sistema de monitoração de reservatório líquidos a uma distância relativamente curta (150 m) com equipamentos simples de baixo custo que não totalizam R$ 300,00 (US$ 60) que podem ser úteis na maioria das aplicações residenciais e industriais. Para distâncias maiores de até 13 km recomenda se a utilização de equipamentos mais potentes com antenas externas que permitem alcance mais longo que nos dias atuais custam em torno de R$ 3.700,00 (US$ 700) que podem ser aplicadas em zonas rurais preferencialmente em locais livres de obstáculos físicos.

Para facilitar os testes de monitoramento, foi atribuído uma ferramenta mais adequada as necessidades expostas, o módulo ESP32-LoRa, bem como a confecção de um módulo sensor de reservatórios líquidos.

Em uma visão didática, o tema abordado neste projeto tem uma importância por

disponibilizar um monitoramento em tempo real em virtude dos estudos e aprendizado da utilização de micro controladores e microprocessadores bem como conhecimentos de eletrônica e suas aplicações.

REFERÊNCIAS

BERTOLETI, P. **Projetos com ESP32 e LoRa**, p.1-56, 2019. Editora NCB. 1ª Edição.2019.

EVANS, B. **Beginning Arduino Programming**. p. 1-78. Editora TIA.1ª Edição.2011.

JUNIOR, S. L. S. SILVA, R. A. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino: Teoria e projetos**. p.23-69. Editora Erica/Saraiva. 2015. 1ª Edição.

KARVINEN, KI. KARVINEN, T. **Primeiros Passos com Sensores: Perceba o Mundo Usando Eletrônica, Arduino e Raspberry Pi**. p.25-59. Editora Novatec.2015. 1ª Edição.

KURNIAWAN, A. **Building Wireless Sensor Networks with ESP32 LoRa**. p. 15-46. Editora PE Press, 2019. 1ª Edição. 2019.

MCROBERTS, M. **Arduino** Básico. p. 15-48. Editora Novatec.2015. 15ª Edição.

SENEVIRATNE, P. **Beginning LoRa Radio Networks with Arduino**.p.79-121.Editora Apress. 1ª Edição. 2019.

SOUZA, V.A. **Programando o ESP32 no Arduino**. p. 3-24. Editora CERNE. eBooks Kindle. 2020.

THOMAZINI, D. URBANO, P. **Sensores industriais: Fundamentos e aplicações**. P.18- 109. Editora Érica. 2009. 8ª Edição.

CAPÍTULO 27

S.A.C SISTEMA DE ASSISTÊNCIA AO CICLISTA

Data de aceite: 01/05/2021

Ricardo Bussons da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

Alexandre Henrique Ferreira Rodrigues
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

Deivid Roberto Almeida Vasconcellos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

Rian Guilherma Braga de Lima
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

San-Cleir Neto Silva Orlanlandes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

Victor Manoel Rosa de Morais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – IFRO Curso Técnico em Eletrotécnica

RESUMO: O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo possibilitar aos ciclistas um monitoramento em tempo real, por meio de um smartphone, de grandezas físicas relacionadas a prática da atividade, tais como, a velocidade instantânea, a distância percorrida e duração do exercício. O sistema permite ainda, que toda a energia elétrica necessária para alimentação do próprio sistema e do smartphone seja gerada durante a atividade com a bicicleta em movimento. Em paralelo, com o objetivo de melhorar a segurança do usuário durante a atividade, o SAC possui as mesmas funções de sinalização, básicas de veículos automotores, ou seja, alertas luminosos (“setas” para direita e esquerda, pisca alerta) e sonoros (buzina), acionados pelo usuário via pontos de controle localizados no guidão da bicicleta, além destes, existe um alerta luminoso autônomo traseiro, instalado abaixo do selin, que indica se a bicicleta está em movimento (luz intermitente) ou parada (luz acesa). Os aspectos construtivos do equipamento, podem ser divididos em quatro grupos, sendo estes, sistema de contagem de giros da roda, sistema de processamento e controle, sistema de envio de dados via bluetooth e sistema de geração de energia elétrica. O cálculo dos valores se dá pelo “sensor de efeito hall” (este envia pulsos elétricos mediante ação magnética) instalado no garfo da roda dianteira e imã, localizado na mesma roda. O processamento de dados é realizado pelo arduíno, um microcontrolador capaz de converter o número de giros da roda em dados de velocidade, distância, entre outros, atuando como o cérebro do sistema. O módulo bluetooth(HC-05), é o responsável pelo envio dos dados calculados ao smartphone do ciclista. Por fim, utiliza-se um dínamo na roda traseira, para alimentar todo o sistema. Um primeiro protótipo do SAC foi testado, analisado, todavia,

melhorias ainda devem ser implementadas, como o desenvolvimento de um aplicativo para smartphone, capaz de armazenar os dados obtidos durante o exercício.
PALAVRAS - CHAVE: Assistência, Autossustentabilidade, Segurança.

ABSTRACT: The present work was developed with the objective of enabling cyclists to monitor in real time, through a smartphone, physical quantities related to the practice of the activity, such as instantaneous speed, distance traveled and duration of exercise. The system also allows all the electrical energy needed to power the system itself and the smartphone to be generated during the activity with the bike in motion. In parallel, in order to improve user safety during the activity, the SAC has the same signaling functions, basic of motor vehicles, i.e. light alerts ("arrows" to the right and left, flashes alert) and audible (horn), triggered by the user via control points located on the handlebars of the bicycle, in addition to these, there is a rear autonomous light alert, installed below the selin, which indicates whether the bike is in motion (flashing light) or stop (light on). The constructive aspects of the equipment can be divided into four groups, these being wheel turn counting system, processing and control system, data sending system by bluetooth and power generation system Electric. The calculation of the values is by the "hall effect sensor" (this sends electrical pulses by magnetic action) installed on the front wheel fork and magnet, located on the same wheel. Data processing is performed by the arduino, a microcontroller capable of converting the number of wheel turns into data of speed, distance, among others, acting as the brain of the system. The bluetooth module (HC-05) is responsible for sending the calculated data to the rider's smartphone. Finally, a dynamo is used on the rear wheel to power the entire system. A first prototype of the SAC was tested, analyzed, however, improvements still need to be implemented, such as the development of a smartphone application, capable of storing the data obtained during the exercise.
KEYWORDS: Renewable Energy; Bicycle; Arduíno; Assistance, Self-Sustainability, Security

1 I INTRODUÇÃO

A Pesquisa Nacional sobre o Perfil do Ciclista Brasileiro organizada pela Transporte Ativo e pelo LABMOB-UFRJ realizaram em 2015 mais de 7.644 entrevistas em diferentes estados brasileiro. 40,8% dos entrevistados responderam falta de segurança no trânsito para a pergunta: “Principal problema enfrentado no uso da bicicleta como meio de transporte”.

Com base na pesquisa acima podemos extrair que a falta de infraestrutura com relação as ciclovias afeta diretamente as segurança nas ruas, pois uma avenida por exemplo que pode ter dezenas de quilômetros de extensão e em nenhum pedaço ter uma ciclovia acaba forçando o ciclista a conduzir a bicicleta no espaço onde trafega os carros e motos, pondo em risco aos motoristas e a si mesmo.

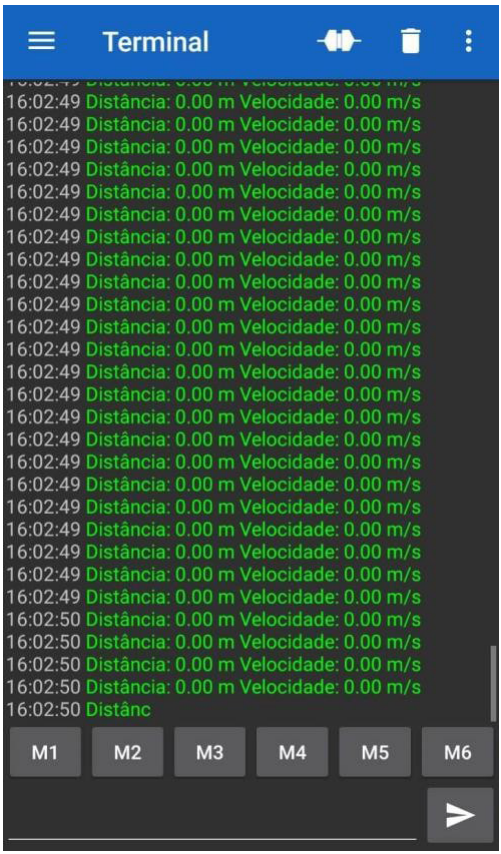
Tendo visto isto, foi criado um projeto pensando na solução para esses problemas, ou seja, que desse segurança ao ciclista nesssas situações.

2 | OBJETIVOS

Nosso objetivo geral foi desenvolver um dispositivo focado em suporte aos ciclistas. E com isso consguimos desenvolver um sistema autossustentavel, tendo um monitoramento de informações via Bluetooth, dando segurança e visibilidade ao ciclista, tambem temos o intuito de criar um aplicativo para dar suporte ao sistema.

3 | O APLICATIVO

Foi feito um protótipo do aplicativo que era para funcionar da seguinte forma: após o sensor de efeito hall obter as leituras, ele manda as informações para o arduino e o arduino manda para o módulo bluetooth que se conecta no aparelho celular, o aplicativo obteria esses dados e reoorganizaria de uma forma que mostraria uma média da distancia e velocidade média. Porem o aplicatico teve certos desajustes que não foi possivel funcionar de forma efetiva, não mostrando as informações de forma correta como vemos na figura a seguir



4 I MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente foi feito pesquisas bibliográficas sobre o tema decidido, A pesquisa bibliográfica foi feita com fontes primárias em produções acadêmicas e artigos científicos.

Após ser feita a pesquisa Temos como foco 4 componentes para o funcionamento do projeto. O primeiro e principal é o Arduíno, este é um microcontrolador capaz de receber e enviar dados que servirá como o cérebro do sistema. O HC-05 é um módulo bluetooth que será responsável por enviar os dados necessários para o smartphone do ciclista. O dínamo é um conversor que transforma energia mecânica (energia do movimento) em energia elétrica. Por último temos o sensor de efeito hall, este é capaz de enviar pulsos elétricos por meio do desvio da corrente elétrica que passa dentro do mesmo por ação magnética (pela aproximação de um imã).

Depois de decidir os componentes, foi feito uma simulação no software de simulação e circuitos elétricos PROTEUS na qual foi obtido certeza do funcionamento do projeto. Tendo os componentes em mãos, foi feito a montagem dos componentes, O Dínamo foi colocado na roda traseira de uma bicicleta com ele convertendo a energia mecânica em energia elétrica em corrente alternada, sendo feita uma ponte de retificadores regulando a tensão para corrente continua, assim sendo nossa fonte de alimentação sem meio externos e autossustentável, a energia foi armazenada em uma bateria que alimenta o circuito já feito em uma placa contendo o Arduíno, o sensor de efeito hall foi posto na roda frontal e colocado um ímã perpendicular ao sensor, ao ser feito isso também foi feito um calculo de rpm (rotações por minuto) na programação para obter as informações de velocidade e distancia percorrida, os dados são processados no microcontrolador e transmitido pelo modulo bluetooth para um aplicativo propriamente desenvolvido. Em relação a segurança foi desenvolvido um sistema de buzina, setas e farol, possibilitando uma melhor locomoção.

5 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema já foi testado, analisado e criticado por profissionais no ramo, foram feitas as alterações necessárias e está apto para uso.

Um primeiro protótipo do SAC foi testado, todavia, melhorias ainda devem ser implementadas antes de uma possível comercialização, como o desenvolvimento de um aplicativo para smartphone, capaz de armazenar os dados obtidos durante o exercício e gerar relatórios de evolução do desempenho físico do usuário, bem como o acréscimo de um GPS (Sistema de Posicionamento Global) para identificação dos percursos realizados.



6 | CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, o sistema atende parte do proposto, pois ao analisar diversos dados do dia a dia, foi possível concluir que grande parte das pessoas ainda evita utilizar a bicicleta devido à segurança nas ruas continuarem ineficazes. Nossos principais objetivos, garantir uma boa funcionalidade e monitoramento das informações, atenderam as expectativas, mas, aprimoramentos sempre são importantes para melhores resultados.

REFERÊNCIAS

Bicicleta Geradora de Energia - http://www.ufrgs.br/bisc/solucao- impressao.php?id=26

CATEYE Velo 9, é um dispositivo que disponibiliza informações como: aceleração, distância total, velocidade máxima, média e atual mostradas em um display LCD. Este possui um formato na qual se fixa de forma centralizada ao guidão. O diferencial que teremos em relação a este projeto é que as informações serão enviadas ao smartphone do usuário.

BI092, é uma espécie de lanterna traseira controlada por controle remoto na qual faz o uso de LEDs de alta potência que podem indicar seta esquerda e direita e farol traseiro, ele apresenta recarregamento via usb. O diferencial que teremos será um recarregamento autônomo, ou seja, sem conectores externos.

CAPÍTULO 28

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

Data de aceite: 01/05/2021

Lucas de Oliveira Soares
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo
Serra – ES
http://lattes.cnpq.br/0530283146210335

Luiz Alberto Pinto
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo
Serra – ES
http://lattes.cnpq.br/3550111932609658

Diego Assereuy Lobão
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Propecaut, Instituto Federal do Espírito Santo
Serra – ES
http://lattes.cnpq.br/2646841619816534

RESUMO: Esse trabalho faz uma análise do desempenho dos classificadores *k-Nearest Neighbor, Support Vector Machine, Decision Tree e Random Forest*, para a classificação de falhas em rolamentos de máquinas elétricas rotativas a partir de sinais de vibração coletados em diferentes condições de operação, isto é, condição de funcionamento normal e com a introdução de diversas condições de falhas simuladas artificialmente. Os descritores utilizados para a construção dos modelos foram extraídos dos sinais de vibração, a partir de parâmetros estatísticos no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizados nos testes foi o *CWRU Bearing Dataset*, e os resultados mostram que os descritores estatísticos apresentam boa separabilidade das classes favorecendo o desempenho dos modelos de classificação, que obtiveram taxas superiores a 99% de acurácia com os classificadores implementados pelos algoritmos Decision Tree e Random Forest.

PALAVRAS - CHAVE: diagnóstico de falhas em rolamentos; descritores estatísticos; extração de características; random forest, cwru data set.

A MACHINE LEARNING AND STATISTICAL DESCRIPTORS BASED APPROACH FOR FAILURE DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINERY BEARINGS

ABSTRACT: This work analyzes the performance of the k-Nearest Neighbor, Support Vector Machine, Decision Tree and Random Forest classifiers, when used to classify bearing failures in rotating electrical machines based on vibration signals collected in different operating conditions, that is, normal operating condition and after the introduction of several artificially simulated failure conditions. The descriptors used to construct the models were extracted from the vibration signals applying statistical parameters in the time domain. The data set used in the tests was the CWRU Bearing Dataset, and the results show that the statistical descriptors present good class separability, favoring the performance of the classification models, which obtained classification rates greater than 99% with the classifiers implemented by the Decision Tree and Random Forest algorithms.

KEYWORDS: bearing failure diagnosis; statistical descriptors; feature extraction; random forest; cwru data set.

1 | INTRODUÇÃO

Ambientes industriais são constituídos por diferentes tipos de equipamentos que fazem parte de sistemas de produção complexos. Entre os diversos tipos de equipamentos que operam nesses ambientes, um dos mais importantes e mais sujeitos a falhas são as máquinas rotativas. Dessa forma, a utilização de técnicas de manutenção eficientes é importante para que esses equipamentos estejam sempre em condições de produção. As estratégias mais eficientes de manutenção consistem no monitoramento automático contínuo das condições de funcionamento das máquinas rotativas, através da coleta e análise de sinais por elas produzidas quando em funcionamento. A implantação de tal estratégia em um ambiente industrial pode reduzir os custos das intervenções e os tempos de parada da produção.

A utilização de técnicas de monitoramento automático das condições de funcionamento de equipamentos através da análise dos sinais do processo, podem auxiliar na identificação, no diagnóstico e na eliminação das falhas em máquinas rotativas. Os autores em ZHANG et al. (2017), afirmam que modelos de diagnóstico de falhas baseados em métodos orientados a dados são vantajosos, pois, podem fornecer diagnósticos precisos, mesmo sem o conhecimento do modelo do processo. Nesses métodos, os diagnósticos são elaborados a partir de dados que, de forma geral, são facilmente obtidos por sensores.

Pela sua natureza dinâmica, quando em funcionamento as máquinas rotativas são submetidas a ação de forças centrífugas, forças de atrito e forças resultantes da vibração das partes móveis ou de folgas no conjunto. Devido a esse sistema de forças atuando sobre o equipamento, as partes móveis sofrem desgastes operacionais, que com o tempo podem resultar no aparecimento de falhas e em quebras intempestivas.

Nesse contexto, os mancais de rolamento se tornam as partes mais sensíveis e sujeitas a falhas das máquinas rotativas. Sob condições adequadas de operação e conservação os mancais de rolamento podem reduzir os efeitos das ações das referidas forças sobre o conjunto, prevenindo o aparecimento de alguns tipos de falhas. De acordo com ZHANG et al. (2019), que investigou a probabilidade de ocorrência de falhas em máquinas rotativas, problemas em rolamentos são responsáveis por cerca de 30% a 40% de todas as falhas nessas máquinas. Como, geralmente, condições anormais de funcionamento de rolamentos se manifestam na forma de vibração, o monitoramento dessa variável é uma das principais ferramentas para acompanhamento das condições de funcionamento das máquinas.

Os mancais de rolamento são partes essenciais das máquinas rotativas industriais, e a manutenção das boas condições de funcionamento dessas partes é fundamental para

a saúde operacional desses equipamentos, e por conseguinte para a manutenção das condições operacionais dos equipamentos industriais. Outro importante aspecto a ser considerado é a grande quantidade de informações, na forma de dados, que podem ser extraídas dos processos através das modernas técnicas de instrumentação disponíveis (CHEN et al., 2019). Nesse contexto, a utilização de técnicas de *Machine Learning* e *Deep Learning* pode ser utilizadas para o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico automáticos de falhas em equipamentos, como por exemplo, rolamentos de motores elétricos, que é o objeto desse estudo.

Este trabalho aborda a utilização de técnicas de *Machine Learning*, *k-Nearest Neighbor*, *Support Vector Machine*, *Decision Tree* e *Random Forest*, para classificação de falhas extraídas de sinais de vibração produzidos por rolamentos de máquinas elétricas. O conjunto de dados utilizado é o da *Case Western Reserve University - CWRU*, disponível abertamente para estudos na área acadêmica. O objetivo é apresentar o desempenho destas ferramentas de classificação em função dos descritores extraídos do sinal vibracional e dos modos de operação do equipamento em função das cargas de trabalho.

Na sequência este trabalho está constituído pelas seguintes seções: a Seção 2 contém a revisão do estado da arte sobre diagnóstico de falhas; a Seção 3 apresenta uma descrição sucinta dos algoritmos de classificação empregados; a Seção 4 traz uma descrição das etapas executadas na realização da pesquisa; a Seção 5 reúne os resultados obtidos e a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas de diagnóstico têm como base a detecção e a classificação das condições anormais de funcionamento. Devido a sua importância no setor industrial, diversos pesquisadores têm se dedicado a estudar a aplicação de técnicas de *Machine Learning* na elaboração de diagnóstico de falhas em sistemas industriais.

Os autores em RAUBER et al. (2015) estudaram a classificação de sinais de vibração utilizando os algoritmos *k-Nearest Neighbors (k-NN), Support Vector Machine (SVM)* e Redes Neurais Artificiais *Multilayer Perceptron (MLP)* para o diagnóstico de falhas em rolamentos. Neste trabalho, são comparados os desempenhos dos classificadores quando implementados com a utilização de descritores obtidos com base em modelos estatísticos, *Wavelet Package Analysis* e análise complexa de envelope. Para a redução da dimensionalidade os autores utilizaram Análise de Componentes Principais - *PCA* e seleção de características, sendo que os melhores resultados foram obtidos por métodos de seleção de características. O modelo construído pela combinação de *Wavelet Package* e o *k-NN* apresentou 99,82% de acurácia, sendo este o melhor valor encontrado.

Em NAYANA e GEETHANJALI (2017), foi estudada a modelagem de sinais de vibração para a detecção de falhas em rolamentos, através de parâmetros estatísticos no

domínio do tempo. Os descritores estatísticos utilizados para a construção dos modelos foram o comprimento de forma de onda (*WL*), alterações no sinal de inclinação (*SSC*), integral de sinal simples (*SSI*), amplitude de Wilson (*WAMP*), valor absoluto médio (*MAV*) e cruzamento zero (*ZC*) sendo estes comparados com os descritores convencionais tais como desvio padrão (*STD*), variância (*VAR*), assimetria (*SKW*), valor médio (*Mean*), raiz média quadrática (*RMS*) e curtose (*KURT*). O estudo realizou a análise dos descritores citados, com uso dos classificadores implementados pelos algoritmos *Naive* Bayes (*NB*), *SVM* e *Linear Discriminant Analysis* (*LDA*). A validação dos modelos foi realizada pela técnica de *k-Fold Cross Validation* com 10 *folds*. Na comparação final do método proposto, com uso dos descritores *WL, SSC, SSI, WAMP, MAV* e *ZC* contra os descritores convencionais no domínio do tempo, todos os classificadores atingiram 100% de acurácia, independente da carga do motor do experimento. Trabalhos realizados por outros autores utilizando o mesmo conjunto de dados, porém com descritores diferentes (*STD, VAR, SKW, Mean, RMS* e *KURT*), obtiveram resultados entre 73% e 99%.

Em TAHIR et al. (2017) os autores propuseram uma abordagem para melhoria da acurácia na classificação de falhas em rolamentos de esferas utilizando preditores extraídos dos sinais de vibração no domínio do tempo. O conjunto de dados utilizados foi obtido em um simulador de falhas na universidade de Curtin-Austrália. Além da classe relacionada ao funcionamento normal, foram registradas medições associadas a problemas nas pistas interna e externa do rolamento. Para a classificação, dez descritores estatísticos no domínio do tempo foram extraídos dos sinais de vibração, que constituíram os dados de entrada para os classificadores *SVM*, *BayesNet*, *Decision Table* e *Decision Tree* (*DT*). Segundo os autores, a abordagem proposta apresentou vantagens substanciais em relação ao custo computacional, pois a utilização dos referidos descritores resultou em modelos eficientes para os sinais de vibração, permitindo a representação deles por uma pequena quantidade de descritores estatísticos, sem perda substancial de informação. Os modelos com os descritores *RMS* e variância, em todos os casos atingiram o valor de 100%. Os classificadores com pior desempenho foram aqueles obtidos com descritores extraídos por valores médios e mediana no algoritmo *DT*, com valores de 73% e 84% respectivamente.

No trabalho de DEY et al. (2019) é proposta a utilização da técnica de autocorrelação com os sinais no domínio do tempo para a detecção de falhas em rolamentos de esferas. Para a obtenção dos modelos os autores extraíram os descritores estatísticos, valor máximo, desvio padrão, variância e valores de pico a pico dos correlogramas construídos. Na etapa de classificação, foram utilizados os algoritmos *Random Forest* (*RF*) e *k-NN*, e a metodologia consistiu na divisão dos processos em três problemas binários e um problema multi-classes. Ambos os classificadores apresentaram acurácia de 100%, o que segundo os autores superou os resultados até então relatados.

Trabalhos recentes mostram uma tendência no uso de técnicas de redes neurais e algoritmos genéticos para diagnóstico de falhas em rolamentos. TOMA et al. (2020)

apresenta uma combinação de técnicas que envolve a utilização de métodos estatísticos, algoritmo genético (AG) e técnicas de aprendizado de máquina para o diagnóstico de falhas em motores. Os descritores são extraídos dos sinais de corrente elétrica com a utilização de AG. Modelos de classificação baseados em *k-NN, DT* e *RF* são treinados e aplicados a identificação de falhas nos rolamentos do equipamento. Os autores relatam taxas de acerto superiores a 97%.

Os autores em AGRAWAL e JAYASWAL (2019) fizeram um estudo comparativo entre uma rede neural artificial (RNA) e *SVM* para o diagnóstico e classificação de falhas em rolamento utilizando *wavelets* contínuas e entropia. Os resultados indicaram o melhor desempenho do *SVM*, que obteve acurácia de 100%, contra 96% das redes neurais.

Em ZHOU et al. (2019) é utilizada uma Rede Neural Convolucional (RNC) para classificação do estado de degradação dos rolamentos. O procedimento consistiu em duas etapas. Na etapa não supervisionada, descritores dos sinais no domínio do tempo são extraídos, e utilizados como entrada de um algoritmo de clusterização *k-Means*, onde as classes são constituídas. Na etapa supervisionada os dados categorizados são fornecidos como entrada para a RNC. A acurácia obtida no treino e teste foram, respectivamente, 98.89% e 98.58%.

3 | REFERENCIAL TEÓRICO

Embora a maioria dos trabalhos recentes abordando o tema do diagnóstico de falhas em sistemas industriais utilizem métodos baseados em *Deep Learning*, os algoritmos de *Machine Learning* convencionais ainda são utilizados para essa finalidade. A seguir é apresentada uma breve descrição dos algoritmos *Support Vector Machine*, *K-Nearest Neighbour*, *Decision Tree* e *Random Forest*, aplicados para o treinamento dos modelos.

3.1 Support Vector Machine – SVM

Support Vector Machine são algoritmos de classificação supervisionada, lineares e binários, que procuram o hiperplano de separação entre as classes, de maneira a maximizar a distância entre as amostras mais próximas (CORTES e VAPNIK, 1995).

A aplicação do *SVM* a problemas não lineares pode ser possível com a utilização de funções *kernel*, que projetam o espaço amostral sobre espaços de maior dimensão onde os dados são linearmente separáveis. Exemplos de funções *kernel* que podem ser utilizadas são, quadrática, gaussiana, polinomial. Embora seja, em sua forma convencional, um algoritmo binário, que suporta apenas problemas com duas classes, a utilização de métodos multi-classe torna o *SVM* aplicável a problemas com mais de duas classes.

3.2 k-Nearest Neighbour - k-NN

Classificadores implementados com base no algoritmo *k-NN* classificam amostras desconhecidas com base na distância entre essas e as amostras atribuídas às classes

envolvidas no problema (DUDA et al., 2001). Por ser de fácil implementação, esses classificadores são amplamente utilizados em problemas de classificação.

Para sua implementação devem ser definidos, o número de vizinhos (*k*), a métrica para o cálculo da distância entre as amostras e a regra de decisão para atribuição de uma classe a uma amostra desconhecida. Uma regra de decisão comumente utilizada é atribuir à amostra desconhecida a classe da maioria das *k* amostras mais próximas.

3.3 Decision Tree – DT

A *DT* é um método de classificação que utiliza a estratégia dividir-para-conquistar, cujo processo de decisão para atribuição de uma classe é constituído por múltiplos estágios (WEBB, 2003). Sua estrutura hierárquica em forma de árvore invertida o torna um classificador de simples implementação. As *DT* são constituídas por nós e ramos.

As regras de decisão estão associadas a nós, onde testes são realizados para a definição do percurso ao longo da árvore. Os ramos representam os possíveis caminhos a serem percorridos de acordo com a decisão tomada no nó precedente. Decisões sucessivas são tomadas até que um nó terminal seja alcançado, onde uma classe é atribuída à amostra desconhecida (DOUGHERTY, 2013). A implementação da *DT* requer a definição prévia da profundidade da árvore e do critério de decisão.

3.4 Random Forest – RF

A *RF* é um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado, que pode ser aplicado a problemas de classificação e regressão. Uma *RF* é constituída por um conjunto de Árvores de Decisão, cujo algoritmo de treinamento mais comumente utilizado é o *bagging*. Como utiliza combinação das árvores de decisão, a Floresta Aleatória, de forma geral, é mais estável e apresenta melhor desempenho quando comparada a outros algoritmos de *Machine Learning*.

A premissa sobre a qual se baseia a *RF* é que, um vetor aleatório v_k para a k-enésima árvore, independente dos vetores aleatórios passados v_1, v_2, v_3,..., v_{k-1}, mas com a mesma distribuição será criado. Com estes vetores aleatórios gerados, em um processo de votação envolvendo as *k* árvores, uma classe será atribuída à amostra desconhecida (BREIMAN, 2001).

4 I METODOLOGIA

Nessa seção é feita uma descrição detalhada da metodologia que orientou a execução do trabalho. O conjunto de dados utilizado para a realização dos testes é apresentado, bem como os descritores extraídos a partir dos sinais. São descritas as etapas de modelagem e os ajustes dos parâmetros utilizados para a configuração dos classificadores.

4.1 Descrição do conjunto de dados

O conjunto de dados de vibração utilizado é um dos mais populares no meio acadêmico para testes com modelos de *Machine Learning* e foi desenvolvido pela *Case Western Reserve University - CWRU*. Para a aquisição dos sinais, um motor com potência nominal de 2 hp foi posto em funcionamento com cargas de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp. Os rolamentos do lado acionado (*DE – Drive End*) e do lado não acionado (*NDE - Non Drive End*) foram danificados artificialmente utilizando eletro-descargas criando erosões com diâmetros de 0,1778 mm a 1,016 mm. Os sinais de vibração foram coletados por acelerômetros nas frequências de amostragem de 12 kHz e 48kHz.

O conjunto de dados original é constituído por seis classes, cujas amostras foram colhidas do rolamento *DE*. Além da condição de funcionamento normal (*HDE*), foram simulados três tipos de falhas: na pista interna (*IR*), nas esferas (BA) e na pista externa em três posições diferentes, centralizada (*ORCENT*), ortogonal (*ORORT*) e oposta (*OROPP*). Para os testes foram utilizadas somente as falhas de diâmetro 0,1778 mm, em todas as potências às quais o motor foi submetido. Os sinais originais de vibração colhidos a partir da simulação das falhas, foram particionados em segmentos de 2000 pontos que constituíram as amostras que foram reunidas nas respectivas classes. A coluna 3 da Tabela 1 apresenta as quantidades de amostras e atributos para cada classe para cada potência do motor.

4.2 Extração de descritores

Os modelos de classificação foram treinados utilizando descritores estatísticos cuja representação matemática está mostrada nas equações de (1) a (5). Alguns trabalhos apresentados na Seção 2, confirmam o bom desempenho desses descritores para a representação de sinais de vibração e sua adequação ao problema de detecção de falhas em rolamentos.

$$Média\ (\mu) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x(i) \quad (1)$$

$$Variância\ (\sigma^2) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x(i) - \mu)^2 \quad (2)$$

$$Assimetria = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{(x(i)-\mu)}{\sigma}\right)^3 \quad (3)$$

$$Curtose = \frac{1}{N}\left(\frac{(x(i)-\mu)}{\sigma}\right)^4 \quad (4)$$

$$Fator\ de\ Crista = \frac{máx(|x|)}{RMS} \quad (5)$$

Nas equações de (1) a (5), a variável *x(i)* representa a *i-ésima* amostra do conjunto de dados. A coluna 4 da Tabela 1 apresenta as dimensões das matrizes de descritores estatísticos por classe, após a aplicação das equações (1) a (5). Após a extração dos descritores estatísticos, as matrizes das classes foram concatenadas formando matrizes

de 420 x 5 para a potência de 0hp, e 540x5 para as demais potências.

Potência	Classe	Matriz de Atributos	
		Original	**Estatístico**
0hp	HDE	120 x 2000	120 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
1hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
2hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5
3hp	HDE	240 x 2000	240 x 5
	IR	60 x 2000	60 x 5
	BA	60 x 2000	60 x 5
	ORCENT	60 x 2000	60 x 5
	ORORT	60 x 2000	60 x 5
	OROPP	60 x 2000	60 x 5

Tabela 1 - Dimensões das matrizes por classe e por potência com os sinais originais segmentados (coluna 3), e após extração de descritores estatísticos (coluna 4)

4.3 Análise do espaço amostral do conjunto de descritores obtidos a partir dos parâmetros estatísticos

A obtenção de modelos com boa capacidade de separação das classes, além do bom desempenho dos algoritmos, depende da extração de descritores que, de fato, permitam uma boa representação do espaço amostral.

A Figura 1 ilustra o espaço amostral representado pelos descritores estatísticos *média x variância,* para potências da carga de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp. Como pode ser observado, a utilização desses descritores para a representação dos sinais de vibração,

permite uma boa separabilidade das classes, o que favorece a obtenção de classificadores com boa capacidade de predição.

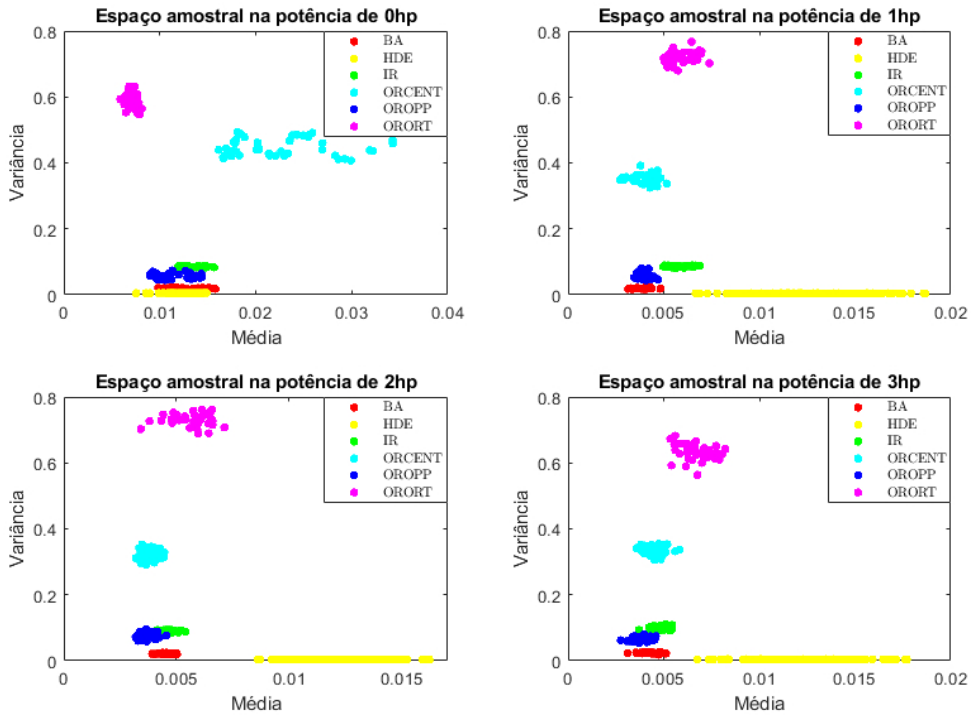


Figura 1 - Espaços amostrais com atributos estatísticos para potências de 0hp, 1hp, 2hp e 3hp

4.4 Treinamento e Validação dos modelos

Os modelos de classificação foram treinados com os algoritmos *k-NN*, *SVM, DT* e *RF*. Os critérios de divisão utilizados para implementação dos classificadores *DT* foram o *gini index* e o *cross entropy*, sendo em todos os casos utilizadas árvores com profundidade 10. No algoritmo *k-NN* foi utilizada a métrica de distância euclidiana e variados os números de vizinhos em 1, 3 e 5. No classificador *SVM* foram testados os *kernels linear*, *gaussian* e *polynomial*. Para os classificadores implementados com a *RF*, os modelos foram treinados com 5,10, 15 e 20 árvores. O conjunto de dados foi dividido entre treino, com 70% das amostras, e teste com os 30% restantes. O desempenho dos modelos foi avaliado pelo método *k-Fold Cross Validation* com *k*=10, e foi utilizada a métrica de acurácia. Todos os testes foram realizados utilizando o Matlab®, versão R2018b.

5 | RESULTADOS

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos pelos classificadores *DT, k-NN, SVM* e *RF*. Como pode ser observado, de forma geral, todos os modelos obtiveram bom desempenho nas etapas de treinamento e teste, atingindo valores de acurácia de 100%, ou próximos desse valor.

Analisando os resultados obtidos utilizando *DT* (Tabela 2), é possível verificar que a regra de divisão utilizando *cross entropy* foi ligeiramente superior ao método utilizando *gini index*. Para o classificador *k-NN* (Tabela 3), em todas as configurações utilizadas para as diferentes cargas de potência do motor, foi possível obter acurácia acima de 91,30% sendo que o melhor resultado foi obtido utilizando o valor de $k = 3$, o qual obteve uma acurácia de 100% nas etapas de treinamento e testes. O classificador *SVM* (Tabela 3), de forma geral, obteve os melhores resultados utilizando o *kernel* do tipo *polynomial*, no qual em todas as configurações obteve acurácia em 100% nas etapas de treinamento e testes. Os modelos de classificação implementados utilizando o algoritmo *RF* (Tabela 4) obtiveram desempenhos acima de 98,40% de acurácia, sendo que, a partir de uma coleção igual ou superior a dez árvores, em todas as configurações foi possível obter taxas de acerto de 100% nas etapas de treinamento e testes para os diferentes tipos de cargas do motor.

Conforme visto anteriormente na Figura 1, os descritores baseados em parâmetros estatísticos apresentam boa separabilidade interclasses e baixa dispersão dos dados intraclasses. A compatibilidade entre os resultados obtidos nas fases de treino e teste, é um indicativo de que os modelos não foram afetados pelo problema do *overfitting*, que ocorre quando o modelo se especializa nos dados de treino e apresenta desempenho ruim na fase de teste.

Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]		Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste			Treino	Teste
0	Entropy	100,00	100,00	2	Entropy	100,00	100,00
	Gini	100,00	100,00		Gini	100,00	100,00
1	Entropy	99,74	100,00	3	Entropy	100,00	100,00
	Gini	99,74	99,42		Gini	100,00	100,00

Tabela 2 - Resultado com Classificador DT

Potência [hp]	k-NN			SVM		
	Parâmetro	Acurácia [%]		Parâmetro	Acurácia [%]	
		Treino	Teste		Treino	Teste
0	k = 1	92,18	91,30	Guassian	93,20	92,90
	k = 2	92,52	93,70	Linear	86,05	86,50
	k = 3	93,54	92,10	Polinomial	98,98	100,00
1	k = 1	100,00	100,00	Guassian	100,00	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	99,74	100,00
	k = 3	100,00	100,00	Polinomial	100,00	100,00
2	k = 1	100,00	100,00	Guassian	100,00	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	99,74	100,00
	k = 3	100,00	100,00	Polinomial	100,00	100,00
3	k = 1	99,74	100,00	Guassian	99,74	100,00
	k = 2	100,00	100,00	Linear	97,88	98,80
	k = 3	99,74	99,74	Guassian	99,74	100,00

Tabela 3 – Resultado com os classificadores k-NN e SVM

Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia [%]		Potência [hp]	Parâmetro	Acurácia	
		Treino	Teste			Treino	Teste
0	5 trees	99,90	100,00	2	5 trees	99,94	100,00
	10trees	99,98	100,00		10 trees	100,00	100,00
	15 trees	99,99	100,00		15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00		20 trees	100,00	100,00
1	5 trees	99,94	99,40	3	5 trees	99,94	100,00
	10 trees	100,00	100,00		10 trees	100,00	100,00
	15 trees	100,00	100,00		15 trees	100,00	100,00
	20 trees	100,00	100,00		20 trees	100,00	100,00

Tabela 4 – Resultado com Classificador RF

6 I CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a utilização de parâmetros estatísticos para a extração de descritores de sinais de vibração obtidos a partir de um simulador de equipamentos dinâmicos, o qual pode simular condições reais de falhas em rolamentos de motores elétricos industriais. Diferentes naturezas de operação, tais como, condição de funcionamento normal (sem falha) e diversos tipos de falhas em rolamentos, de ocorrência comum em equipamentos rotativos utilizados em instalações industriais, foram simuladas. Os resultados experimentais obtidos com os descritores baseados em parâmetros estatísticos, e com a utilização dos algoritmos de classificação *Decision Tree (DT), k-Nearest Neighbor*

(k-NN), Support Vector Machine (SVM) e *Randon Forest (RF)*, indicam a viabilidade da implementação de sistemas de diagnóstico de falhas com boa capacidade de classificação. Os classificadores com pior desempenho tiveram acurácia acima de 90%, e várias configurações de classificação tiveram 100% de acerto na fase de teste. Os melhores resultados foram obtidos com o classificador *DT*, utilizando *entropy* como regra de decisão, e com o classificador *RF* com uma coleção de dez árvores. O bom resultado apresentado com os descritores baseados em dados estatísticos comprova a boa separabilidade dos dados, o que facilita o desempenho dos algoritmos de classificação utilizados. Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que a utilização de descritores extraídos a partir de parâmetros estatísticos no domínio do tempo, juntamente com algoritmos de *Machine Learning* eficientes podem resultar em sistemas de diagnósticos de falhas precisos e confiáveis para o monitoramento de equipamentos dinâmicos em instalações industriais.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, P. e JAYASWAL, P. (2019). **Diagnosis and classifications of bearing faults using artificial neural network and support vector machine**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 1–12. doi:10.1007/s40032-019-00519-9.

BREIMAN, L. (2001). **Random forests**. Machine Learning, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

CHEN, Z., GRYLLIAS, K., e LI, W. (2019). **Mechanical fault diagnosis using Convolutional Neural Networks and Extreme Learning Machine**. Mechanical Systems and Signal Processing, 133, 106272. doi:10.1016/j.ymssp.2019.106272.

CORTES, C. e VAPNIK, V. (1995). **Support-vector networks**. In Machine Learning, 273–297.

DEY, S., ROY, S.S., SAMANTA, K., MODAK, S., e CHATTER-JEE, S. (2019). **Autocorrelation based feature extraction for bearing fault detection in induction motors**. In 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), 1–5.

DOUGHERTY, G. (2013). **Pattern Recognition and Classification: An Introduction**. Springer Publishing Company, Incorporated.

DUDA, R.O., HART, P.E., e STORK, D.G. (2001). **Pattern Classification**. Wiley, New York, 2 edition.

NAYANA, B.R. e GEETHANJALI, P. (2017). **Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal**. IEEE Sensors Journal, 17(17), 5618–5625.

RAUBER, T.W., e VAREJAO, F.M. (2015). **Heterogeneous feature models and feature selection applied to bearing fault diagnosis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(1), 637–646.

TAHIR, M.M., KHAN, A.Q., IQBAL, N., HUSSAIN, A., e BADSHAH, S. (2017). **Enhancing fault classification accuracy of ball bearing using central tendency based time domain features**. IEEE Access, 5, 72–83.

TOMA, R., PROSVIRIN, A., e KIM, J. (2020). **Bearing fault diagnosis of induction motors using a genetic algorithm and machine learning classifiers**. Sensors. doi:10.3390/s20071884.

WEBB, A. (2003). **Statistical Pattern Recognition**. Wiley Inter Science electronic collection. Wiley.

ZHANG, R., PENG, Z., WU, L., YAO, B., e GUAN, Y. (2017). **Fault diagnosis from raw sensor data using deep neural networks considering temporal coherence**. Sensors, 17,549. doi:10.3390/s17030549.

ZHANG, S., ZHANG, S., WANG, B., e HABETLER, T.G. (2019). **Machine learning and deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review**. CoRR, abs/1901.08247.

ZHOU, Q., SHEN, H., ZHAO, J., LIU, X., e XIONG, X. (2019). **Degradation state recognition of rolling bearing based on k-means and cnn algorithm**. Shock and Vibration, 2019, 1–9. doi:10.1155/2019/8471732.

SOBRE OS ORGANIZADORES

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

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

Atena Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA: O MUNDO SOB PERSPECTIVAS AVANÇADAS

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br