

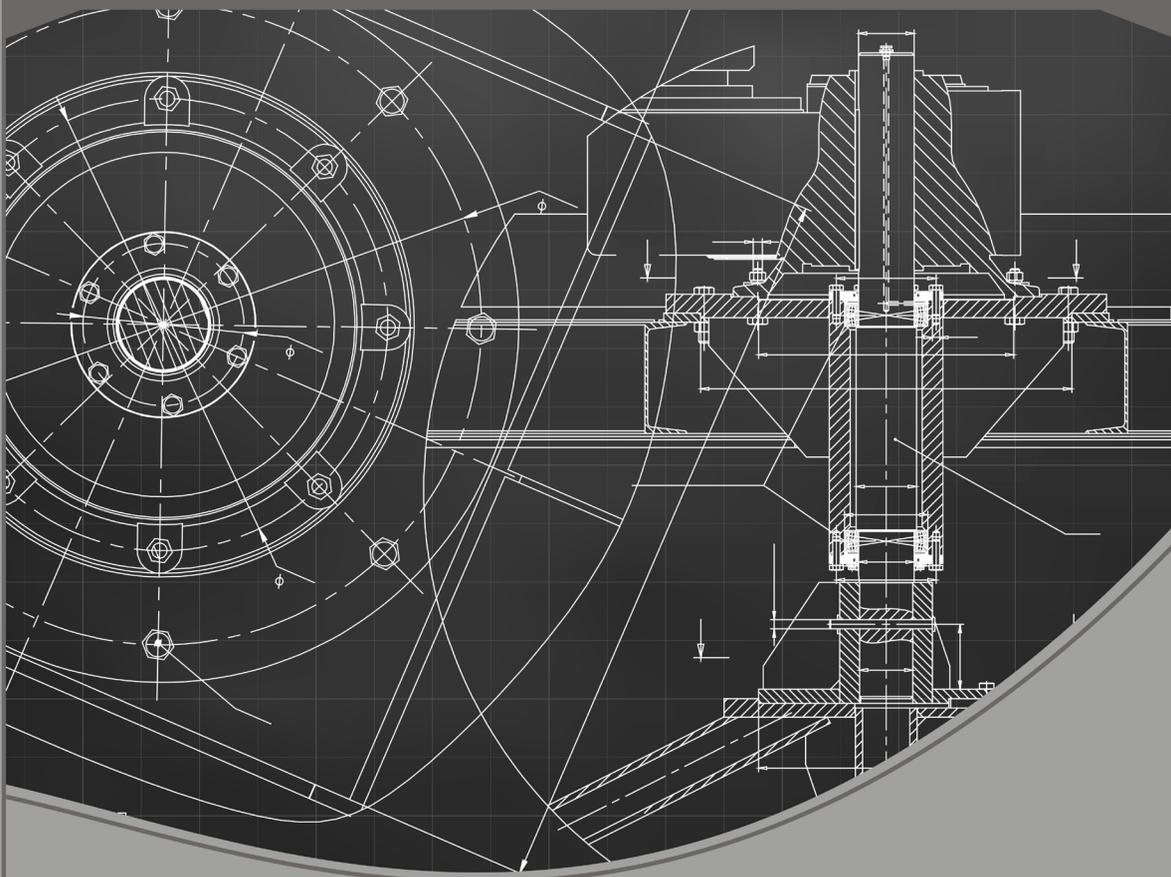
# Engenharia Mecânica:

A Influência de Máquinas, Ferramentas  
e Motores no Cotidiano do Homem

**Henrique Ajuz Holzmann**

**João Dallamuta**

(Organizadores)



**Atena**  
Editora

Ano 2021

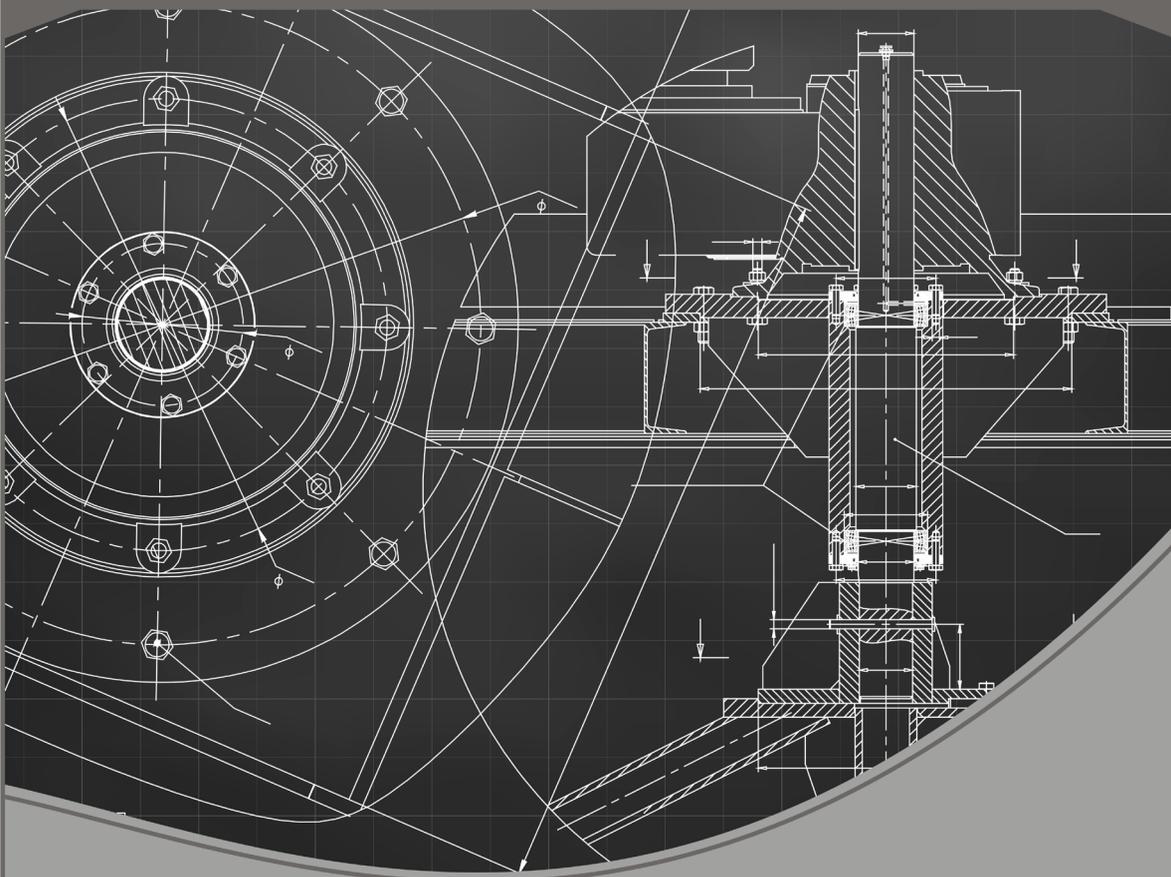
# Engenharia Mecânica:

A Influência de Máquinas, Ferramentas  
e Motores no Cotidiano do Homem

**Henrique Ajuz Holzmann**

**João Dallamuta**

(Organizadores)



**Atena**  
Editora

Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

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

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ivone Goulart Lopes – Instituto 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfnas

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

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federaci 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

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Linguística, Letras e Artes**

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> 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. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa  
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein  
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
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  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lilians Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas  
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo  
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
Prof<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

# Engenharia mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
**Bibliotecária:** Janaina Ramos  
**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista  
**Revisão:** Os Autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-882-3

DOI 10.22533/at.ed.823211703

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.  
CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

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

contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica e materiais, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

PROPRIEDADES FÍSICAS E QUALIDADE DE COLAGEM DE PAINEL COMPENSADO  
PRODUZIDO COM LÂMINAS TERMORRETIFICADAS E RESINA POLIURETANA

Danilo Soares Galdino

Cristiane Inácio de Campos

Ricardo Marques Barreiros

**DOI 10.22533/at.ed.8232117031**

### **CAPÍTULO 2..... 9**

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA EM AERONAVES NÃO  
TRIPULADAS

João Gabriel Benedito Duarte

Mayara Auxiliadora Castilho Benites

Victor Leone Rabito Chaves

Edson Godoy

Vanessa Motta Chad

Márcia Moreira Medeiros

**DOI 10.22533/at.ed.8232117032**

### **CAPÍTULO 3..... 22**

APLICAÇÃO DE UM MECANISMO BALANCE BAR A UM SISTEMA DE FREIO DE UM  
VEÍCULO *OFF ROAD* DO TIPO BAJA

Gustavo da Rosa Fanfa

Bruno Almeida Nunes

Antonio Domingues Brasil

**DOI 10.22533/at.ed.8232117033**

### **CAPÍTULO 4..... 34**

DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO ALTERNATIVO PARA  
APROVECHAR LA ENERGÍA POTENCIAL DEL AGUA

Diógenes Manuel de Jesús Bustan Jaramillo

José Leonardo Benavides Maldonado

Andrea del Pilar Narváez Ochoa

**DOI 10.22533/at.ed.8232117034**

### **CAPÍTULO 5..... 48**

AVALIAÇÃO TÉRMICA DE VEICULOS COM E SEM PELICULA TÉRMICA

Weverson Carlos Fortes

Maribel Valverde Ramirez

**DOI 10.22533/at.ed.8232117035**

### **CAPÍTULO 6..... 57**

COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA AND PREDICTION MODELS OF MINIMUM  
FLUIDIZATION VELOCITY FOR A RICE HUSK AND SAND MIXTURE IN FLUIDIZED BED

Fernando Manente Perrella Balestieri

Carlos Manuel Romero Luna

Ivonete Ávila

**DOI 10.22533/at.ed.8232117036**

**CAPÍTULO 7..... 65**

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PARA AVALIAÇÃO DOS ATUAIS PROCESSOS DE SECAGEM DE GRÃOS**

José Roberto Rasi

Mario Mollo Neto

Roberto Bernardo

**DOI 10.22533/at.ed.8232117037**

**CAPÍTULO 8..... 81**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA INTERFACE HÁPTICA PARA TESTES DE CONTROLE MOTOR. DESIGN E VALIDAÇÃO DE UMA NOVA INTERFACE MECÂNICA**

Adriano Augusto Antongiovanni

Arturo Forner Cordero

**DOI 10.22533/at.ed.8232117038**

**CAPÍTULO 9..... 100**

**BRAÇO ROBÓTICO UTILIZANDO SENSOR DE COR PARA SEPARAÇÃO DE OBJETOS**

Airam Toscano Lobato Almeida

Gefté Alcantara de Almeida

Eduardo Garcia Medeiros

Douglas Pires Pereira Junior

Samuel Vasconcelos de Oliveira

Carlos Henrique Cruz Salgado

**DOI 10.22533/at.ed.8232117039**

**CAPÍTULO 10..... 106**

**BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE NIÓBIO ATRAVÉS DA CONCENTRAÇÃO POR PROCESSOS MECÂNICOS E SOLUÇÕES QUÍMICAS: ESTUDO TEÓRICO APROFUNDADO**

Luiz Eduardo Ortigara

Mario Wolfart Júnior

Carlos Wolz

**DOI 10.22533/at.ed.82321170311**

**CAPÍTULO 11..... 120**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DE ECLUSAS PARA OS COMBOIOS PADRÃO TIETÉ**

Antonio Eduardo Assis Amorim

**DOI 10.22533/at.ed.82321170312**

**CAPÍTULO 12..... 131**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR CAPTURA DE IMAGEM**

Giovanni Luiz Fredo

Paulo Rogério Novak

DOI 10.22533/at.ed.82321170313

<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>142</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>143</b>

# CAPÍTULO 1

## PROPRIEDADES FÍSICAS E QUALIDADE DE COLAGEM DE PAINEL COMPENSADO PRODUZIDO COM LÂMINAS TERMORRETIFICADAS E RESINA POLIURETANA

*Data de aceite: 01/03/2021*

*Data de submissão: 05/01/2021*

### **Danilo Soares Galdino**

UNESP – Universidade Estadual Paulista  
Guaratinguetá/SP  
<http://lattes.cnpq.br/2989657369177458>

### **Cristiane Inácio de Campos**

UNESP – Universidade Estadual Paulista  
Itapeva/SP  
<http://lattes.cnpq.br/1216644357418833>

### **Ricardo Marques Barreiros**

UNESP – Universidade Estadual Paulista  
Itapeva/SP  
<http://lattes.cnpq.br/8792039758223621>

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e a qualidade de colagem de painel de madeira compensada produzido com lâminas termorretificadas coladas com resina poliuretana. O processo de termorretificação foi realizado em prensa termo aquecida nas temperaturas de 160, 180 e 200 °C. Foram realizados os ensaios para a determinação de massa específica aparente, teor de umidade, absorção de água e cisalhamento na linha de cola, avaliados de acordo com documentos normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As propriedades de massa específica e teor de umidade sofreram pouca influência quanto ao tratamento térmico, enquanto alterações significativas foram constatadas nas propriedades de absorção de água e tensão

de ruptura na linha de cola. De modo geral, os ganhos com a estabilidade dimensional devem ser balanceados com a redução da tensão de ruptura na linha de cola.

**PALAVRAS-CHAVE:** Painel compensado; Termorretificação; Características físicas; Colagem, Resina Poliuretana.

### PHYSICAL PROPERTIES AND BONDING QUALITY OF PLYWOOD PRODUCED WITH HEAT TREATED VENEERS AND POLYURETHANE RESIN

**ABSTRACT:** The aim of this work was to evaluate the physical properties and the shear bond strength of plywood panel produced with heat-treated veneers glued with polyurethane resin. The thermal treatment process was carried out in a heat press at temperatures of 160, 180 and 200 °C. Tests were carried out to determine the apparent specific mass, moisture content, water absorption and shear bond strength, evaluated according to normative documents of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The specific mass and moisture content properties suffered little influence in terms of heat treatment, while significant changes were observed in the water absorption properties and tension in the glue line. In general, the gains in dimensional stability must be balanced with the reduction of the bond strength.

**KEYWORDS:** Plywood, heat treatment, physical characteristics; bond strength, polyurethane resin.

## 1 | INTRODUÇÃO

Painéis compensados, assim como a madeira, podem ter suas propriedades de resistência à umidade e ataque de organismos xilófagos melhoradas através da técnica de tratamento preservante, sendo o térmico uma solução sustentável. Esses painéis são produzidos, principalmente, por resina fenólica, entretanto, adesivos alternativos como a resina poliuretana vêm sendo utilizada em estudos recentes.

No Brasil, a resina poliuretana derivada do óleo de mamona possui a vantagem de ser originária de matéria-prima natural e renovável a preços razoáveis e não agressiva ao homem nem ao meio ambiente.

Algumas pesquisas já mostraram a viabilidade de uso desta resina no segmento, cuja qualidade do produto é próxima ou até mesmo superiores aos painéis produzidos com as resinas tradicionais (CAMPOS et. al., 2009), todavia, pouco ainda se sabe a respeito da influência do tratamento térmico nos painéis colados com esse adesivo.

A termorretificação diminui a higroscopicidade da madeira, melhorando sua estabilidade dimensional, reduzindo a umidade de equilíbrio e aumentando a sua durabilidade (TJEERDSMA e MILITZ, 2005; YILDIZ, GEZER e YILDIZ, 2006; POUBEL et al. 2013), porém, influencia de forma negativa algumas propriedades mecânicas (ARAÚJO et al, 2012).

Durante o tratamento ocorre a degradação dos componentes químicos essenciais da madeira, principalmente das hemiceluloses que são mais sensíveis ao calor (PONCKSAC, 2006). Essas alterações afetam a colagem, sendo a molhabilidade a principal propriedade que sofre influência (FERREIRA, CAMPOS e RANGEL, 2018).

A aplicação do tratamento térmico, como pode ser visto, resulta em um produto com características diferenciadas que a depender do seu uso podem inviabilizar a sua aplicação. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos da termorretificação de lâminas nas propriedades físicas e de colagem do painel compensado produzido com resina poliuretana.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Termorretificação das lâminas

Para a produção dos compensados foram usadas lâminas com 2,3 mm de espessura (nominal) e da espécie *Pinus taeda*. As lâminas para a pesquisa foram doadas pela empresa Miraluz – Indústria e Comércio de Madeiras Ltda., produtora de compensados, localizada no município de Sengés/PR. As lâminas secas foram esquadrejadas nas dimensões de 450 x 450 mm, sendo que tais dimensões foram determinadas especialmente devido à dimensão da pré-prensa e prensa envolvida na pesquisa.

O tratamento térmico das lâminas foi realizado em prensa pelo período de tempo

de 30 minutos. No tratamento as lâminas foram submetidas individualmente à aplicação de pressão de 50 bar e temperatura inerente a cada tratamento térmico (160, 180 e 200 °C).

## 2.2 Produção dos painéis

A resina usada foi a poliuretana derivada do óleo de mamona, tipo bicomponente, aplicada manualmente com a utilização de uma espátula plástica, utilizando para a produção dos painéis uma gramatura de adesivo de 395 g/m<sup>2</sup> com a linha de cola dupla, tendo apenas uma das faces das lâminas preenchidas com o adesivo. Com isso, para cada linha de cola foram usados 63,2 g e, conseqüentemente, 390 g de adesivo por painel produzido.

As cinco lâminas foram sobrepostas em camadas ortogonais e pré-prensadas a frio - em prensa pneumática manual com pressão de 2 kgf/cm<sup>2</sup> por 15 minutos. Em seguida foi feita a prensagem a quente em prensa hidráulica aquecida com pressão máxima de 6 kgf/cm<sup>2</sup>, a uma temperatura de 90°C por um tempo de 10 minutos. Tal tempo de prensagem foi dividido em 3 ciclos, cada um deles com 3 minutos de duração e adicionado 30 segundos para o alívio de pressão entre os ciclos. Após a prensagem o painel foi acondicionado em ambiente climatizado de 25 °C e 60% de umidade relativa - por 72 horas antes de ser seccionado para confecção dos corpos de prova.

## 2.3 Caracterização

Os painéis produzidos foram caracterizados mecanicamente de acordo com as normativas brasileiras, sendo estas: ABNT NBR 9484:2011, ABNT NBR 9485:2011, ABNT NBR 9486:2011 e ABNT NBR ISO 12466-1:2012. Para cada teste o número de amostras foi seis. Os ensaios foram realizados no Câmpus Experimental de Itapeva - UNESP.

## 2.4 Análise estatística

A partir dos resultados obtidos foi realizada análise de variância (ANOVA), pelo teste de Tukey com 5% de significância, para todos os resultados dos ensaios realizados. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R versão 3.4.2 (2016).

# 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Propriedades físicas

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos ensaios físicos de massa específica aparente, teor de umidade e absorção de água após imersão por 24 horas para os painéis compensados produzidos com resina poliuretana para cada faixa de temperatura de tratamento.

Temperatura (°C)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	T.U. (%)	Absorção (%)
Testemunha	0,589 <sup>(0,059)</sup> a	6,67 <sup>(0,37)</sup> a	46,49 <sup>(3,07)</sup> a
160	0,553 <sup>(0,023)</sup> a	6,22 <sup>(0,40)</sup> a	28,28 <sup>(5,41)</sup> b
180	0,525 <sup>(0,035)</sup> a	5,76 <sup>(1,47)</sup> a	31,47 <sup>(3,90)</sup> b
200	0,563 <sup>(0,058)</sup> a	5,66 <sup>(0,72)</sup> a	32,03 <sup>(4,93)</sup> b

\* Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Tabela 1 – Massa específica, umidade de equilíbrio higroscópico e capacidade de absorção em função dos tratamentos

Os resultados mostraram que os painéis tratados termicamente tiveram baixa perda de massa, resultando em um painel de massa específica equivalente à testemunha. Os mesmos resultados foram obtidos por Brito et al. (2006) estudando madeira de *Eucalyptus grandis* a temperatura de termorreificação inferior a 200 °C.

Em relação à umidade de equilíbrio higroscópico, embora estatisticamente equivalente os resultados, observa-se um ligeiro decréscimo dos valores conforme aumento da temperatura. A tendência de queda de umidade coaduna com os estudos conduzidos por Tjeerdsma e Militz (2005) e Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) no sentido que a termorreificação diminui a umidade de equilíbrio da madeira.

Os resultados mostraram mudanças significativas na absorção de água para painéis produzidos com lâminas tratadas termicamente, sendo que nenhum destes foi estatisticamente equivalente à testemunha. A diminuição de absorção para os painéis tratados é explicada por Poncksac (2006) como decorrente da degradação da hemicelulose, que além de ser o constituinte mais hidrófilo da madeira, é também o mais sensível termicamente, sendo o primeiro componente a ser destruído, levando ao desaparecimento dos sítios de adsorção de água (principalmente os grupos hidroxilas). A perda de higroscopicidade confere ao mesmo uma melhor estabilidade dimensional

### 3.2 Propriedades de colagem

A Tabela 2 apresenta a média e os respectivos desvios padrões dos valores de tensão de ruptura na linha de cola para painéis produzidos com 5 lâminas termorreificadas e com resina poliuretano à base de mamona em diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Testemunha	160 °C	180°C	200°C
Tensão (MPa)	2,41 <sup>(0,38)</sup> a	1,55 <sup>(0,36)</sup> b	1,67 <sup>(0,43)</sup> b	1,34 <sup>(0,19)</sup> b
Percentual de redução (%)	-	35,7	30,7	44,4

\* Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Tabela 1 – Tensão de ruptura na linha de cola em função dos tratamentos

A análise estatística indicou a diferença significativa da tensão de ruptura da linha de cola para painéis produzidos com lâminas tratadas termicamente, sendo que nenhum destes foi estatisticamente equivalente à testemunha, o que aponta que a temperatura teve influência nessa propriedade. Os painéis tratados sofreram uma redução superior a 30% da tensão de ruptura na linha de cola, mas mesmo com essa redução continuaram atendendo aos limites normativos que determinam aceitável a tensão de ruptura adequada a partir de 1,0 MPa independente se a ruptura ocorreu na madeira ou na resina.

Resultados similares quanto a influência da termorretificação na qualidade de colagem da madeira foram encontrados por Sernek et al. (2008) que estudaram a ligação de produtos não-tratados, e madeira tratada termicamente com diferentes adesivos e concluíram que o tratamento térmico afetou a resistência ao cisalhamento e a delaminação da madeira laminada dependendo do sistema adesivo utilizado para colagem. O pH baixo e a molhabilidade da madeira tratada termicamente foram propostos como sendo as principais razões para esta diferença.

Ferreira et al. (2018) realizou a termorretificação de painéis compensados em temperaturas que variaram de 160 a 200°C produzidos com lâminas de Pinus e adesivo fenol-formaldeído. A partir do teste de molhabilidade os autores concluíram que as superfícies das lâminas se tornaram mais hidrofóbicas com o aumento da temperatura, e isso influenciou na diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola no teste mecânico.

A seguir serão apresentados graficamente os resultados obtidos neste experimento para: massa específica, Figura 1, teor de umidade, Figura 2, absorção de água após imersão em água por 24 horas, Figura 3, tensão de ruptura na linha de cola, Figura 4.

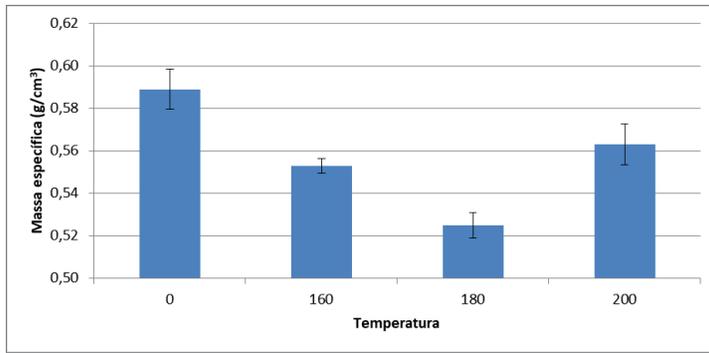


Figura 1. Massa específica.

Fonte: Autoria própria.

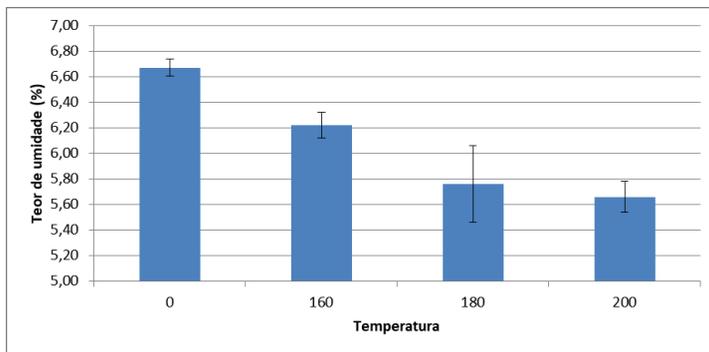


Figura 2. Teor de umidade.

Fonte: Autoria própria.

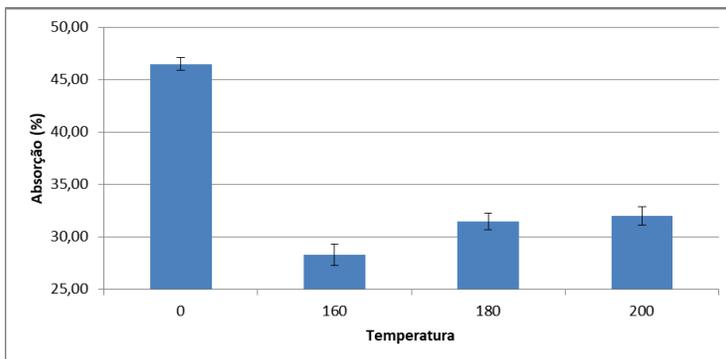


Figura 3. Absorção de água.

Fonte: Autoria própria.

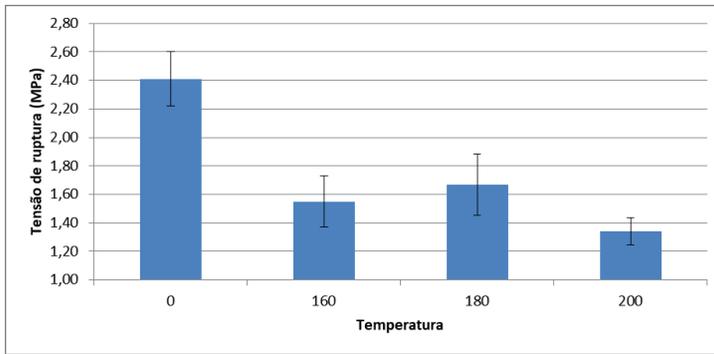


Figura 4. Tensão de ruptura

Fonte: Autoria própria.

## 4 | CONCLUSÕES

O estudo dos painéis fabricados com lâminas tratadas termicamente e produzidos com resina poliuretana à base mamona se mostrou interessante em vista da compreensão em relação ao seu desempenho físico e a qualidade de colagem para seu uso de maneira geral.

Nas propriedades físicas não houve alteração significativa na massa específica e teor de umidade, embora em relação a esse último seus valores parecem diminuir conforme se aumenta a temperatura de termorretificação.

A perda de higroscopicidade do painel produzido com lâminas tratadas termicamente permite a obtenção de um produto com melhor estabilidade dimensional com ligeira redução da qualidade de colagem, o que leva a concluir que a termorretificação é uma alternativa viável já que mesmo após o tratamento os painéis continuaram atendendo aos limites normativos.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, S. O.; VITAL, B. R.; MENDOZA, Z. M. S. H.; VIEIRA, T. S.; CARNEIRO, A. C. O.

**Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP.** Sci. For., Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336, set. 2012.

BRITO, J.O. et al. **Densidade básica e retrabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação.** Cerne, Lavras, v. 12, n. 2, p 182-188, abr./jun. 2006.

CAMPOS, Cristiane Inácio; MORAIS, Rafael Diogo Vasconcelos; NASCIMENTO, Maria de Fátima.

**Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzidos com *Pinus sp.* e resina poliuretana bi-componente.** Revista Madeira, Arquitetura & Engenharia, São Carlos, ano 10, n.24, p. 37-50, 2009.

FERREIRA, Bruno Santos; CAMPOS, Cristiane Inácio de; RANGEL, Elidiane Cipriano. EFEITO DA TERMORRETIFICAÇÃO NA QUALIDADE DE COLAGEM DE LÂMINAS DE MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DE COMPENSADO. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.274-282, 2 abr. 2018. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509831585>.

PONCSÁK, S. et al. **Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*)**. Wood Science Technology, v.40, p.647-663, 2006.

SERNEK, M., BOONSTRA, M., PIZZI, A. DESPRES, A., AND GERARDIN, P. (2008). “**Bonding performance of heat-treated wood with structural adhesives,**” Holz Roh-Werkst. 66(3), 173-180.

TJEERDSMA, B. F.; P. MILITZ, H. **Chemical changes in hydrothermal treated wood: ftir analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood**. Holzforschung, v. 63, p. 102–111, 2005.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. **Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat**. Building and Environment, v. 41, n. 12, p. 1762–1766, 2006.

## ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA EM AERONAVES NÃO TRIPULADAS

*Data de aceite: 01/03/2021*

**João Gabriel Benedito Duarte**

<http://lattes.cnpq.br/6458427490778373>

**Mayara Auxiliadora Castilho Benites**

<http://lattes.cnpq.br/3034663017129904>

**Victor Leone Rabito Chaves**

<http://lattes.cnpq.br/9916924194968418>

**Edson Godoy**

<http://lattes.cnpq.br/0728397597035898>

**Vanessa Motta Chad**

<http://lattes.cnpq.br/7103848848957071>

**Márcia Moreira Medeiros**

<http://lattes.cnpq.br/8260391121543962>

**RESUMO:** Ligas com Memória de Forma (LMF) são estudadas para aplicações em diversas áreas. Atualmente é possível encontrar esses materiais em diversas aplicações, como acoplamento para junção de tubos aeronáuticos, próteses mecânicas, stents vasculares, aparelhos ortodônticos, armações de óculos, entre outros. LMF são ligas metálicas que sofrem uma transformação de fase em função da aplicação de cargas termomecânicas, e são capazes de memorizar e recuperar sua forma primária após passarem por um processo de deformação, através do aquecimento do material acima da sua temperatura de transformação martensítica. Pesquisadores vêm realizando diversos estudos visando a aplicação dessa classe de materiais

como atuadores. De maneira geral, a aplicação de LMFs como atuadores apresenta um grande potencial, visto que esses materiais apresentam uma eficiência maior em relação aos atuadores convencionais. Este trabalho visa avaliar as propriedades de uma liga NiTi com efeito memória de forma para atuação como atuadores. As propriedades estudadas foram a deformação do material e capacidade de carga em função da corrente aplicada. Além desses estudos, também se verificou a aplicabilidade de LMFs como atuadores, de forma a viabilizar a substituição dos servomecanismos e sistemas hidráulicos por sistemas inteligentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ligas com Memória de Forma, Atuadores, Ensaio Mecânico.

**ABSTRACT:** Shape memory alloys (SMA) are studied for applications in several areas. Currently it is possible to find these materials in several applications, such as coupling for aeronautical tube joints, mechanical prostheses, vascular stents, orthodontic appliances, eyeglass frames, among others. SMA are metal alloys that undergo a phase transformation due to the application of thermomechanical loads, and are capable of memorizing and recovering their primary shape after undergoing a deformation process, by heating the material above its martensitic transformation temperature. Researchers have been conducting several studies aiming at the application of this class of materials as actuators. In general, the application of SMAs as actuators presents a great potential, since these materials present a greater efficiency in relation to conventional ones. This work aims to evaluate

the properties of a NiTi alloy with memory effect to act as actuator. The properties studied were the deformation of the material and load capacity as a function of the current applied. Besides these studies, it was also verified the applicability of SMAs as actuators, in order to make possible the replacement of servomechanisms and hydraulic systems by intelligent systems.

**KEYWORDS:** Shape Memory Alloys, Actuators, Mechanical Test.

## 1 | INTRODUÇÃO

Ligas com efeito memória de forma (EMF) são ligas metálicas que quando deformadas podem voltar a sua forma anterior por meio do aquecimento da liga. Esse material vem sendo amplamente estudado como uma alternativa aos atuadores mecânicos em função de suas propriedades. Costuma-se encontrar aplicações nas áreas de robótica, automotiva, aeroespacial e biomédica.

O efeito memória de forma (EMF) se dá através da mudança de sua estrutura cristalina, que ocorre por meio de uma transformação martensítica estimulada pela aplicação de cargas termomecânicas. São capazes de recuperar sua forma original através do aquecimento acima da temperatura de transformação martensítica, devido a sua característica de “memorizar forma”.

Atualmente existem vários estudos buscando aplicações dessa classe de material como atuadores, principalmente no setor aeroespacial, com aplicações como o *Cryofit* no F-14 ou os *chevrons* no Boeing 787.

Atuadores são considerados os músculos dos sistemas mecânicos, já que são elementos capazes de converter energia armazenada em um sistema para movimento. Diversos atuadores são empregados como fonte de movimento e força.

Recentemente outros tipos de atuadores vem aparecendo, sendo eles os baseados em ligas com EMF e já se mostraram mais eficazes quando comparados aos atuadores convencionais, tendo em vista que apresentam uma significativa redução no volume do dispositivo e a capacidade de controlar posição sem a necessidade do uso de motores ou outros mecanismos de movimento. Com base nisso, o principal motivo para a realização desse trabalho é avaliar as características de um fio LMF a fim de contribuir na aplicação desse material em atuadores sendo um referencial bibliográfico para pesquisas posteriores.

## 2 | REVISÃO DE LITERATURA

Um dos primeiros relatos referentes ao efeito memória de forma que se tem registro é da década de 1930, quando, A. Olander observou o comportamento pseudoelástico da liga Au-Cd, em 1932 (OTSUKA, 1998). Em 1938, Greninger & Moorandian observaram o desaparecimento de uma fase martensítica pela diminuição e aumento da temperatura em uma liga Cu-Zn. Uma década mais tarde (1949), Kurdjumov & Khandros fizeram diversos

relatos referentes ao efeito de memória causado pelo comportamento termoelástico da fase martensítica. Desde então, diversas ligas com efeito memória de forma foram descobertas.

Na década de 1960, Buehler (1967) e outros pesquisadores do *U.S Naval Ordnance Laboratory* (NOL) descobriram o efeito memória de forma em uma liga de níquel e titânio, sendo essa descoberta considerada um grande avanço nas pesquisas de materiais com efeito memória de forma. Essa liga (NiTi) foi nomeada Nitinol (Níquel-Titânio *Naval Ordnance Laboratory*). A partir de então, diversas investigações foram conduzidas no intuito de compreender melhor os mecanismos básicos de funcionamento desse material.

Nesse capítulo será apresentada a base teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho, abordando os assuntos mais relevantes para esse trabalho.

## 2.1 Ligas com Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma (EMF) é a capacidade que um material metálico tem de “memorizar” sua forma primária, e, após passar por um processo de deformação, ser capaz de recuperar sua forma original por meio de aquecimento da liga a temperaturas superiores à temperatura de transformação martensítica. O processo de transformação que ocorre nesse material envolve duas fases, sendo elas, martensita (baixa temperatura) e austenita (alta temperatura). É válido ressaltar que tanto a austenita quanto a martensita podem ser a fase estável a temperatura ambiente. A transformação que ocorre nesse tipo de material difere das transformações que ocorrem nos materiais convencionais, pois neste tipo de liga a transformação ocorre de maneira abrupta (OLIVEIRA, 2007).

Atualmente, ligas com efeito memória de forma estão entre os materiais mais promissores, pois seu potencial de aplicações em diversas áreas tem criado uma enorme demanda por pesquisa, na intenção de ampliar cada vez mais seus campos de atuação (DIAS, 2005). As ligas CuAlNi, CuZnAl, NiTiCu entre outras são utilizadas comercialmente em diversas aplicações (RAO, 2015), com um destaque especial para a liga NiTi.

A liga de níquel-titânio (NiTi) com composição estequiométrica é a mais utilizada, pois apresenta melhores características em aplicações práticas, sendo superior a ligas como a de cobre-zinco-alumínio (CuZnAl) (COURA, 2016), que é muito utilizada devido ao seu baixo custo (FUNAKUBO E KENNEDY, 1987). A tabela 1 compara mais detalhadamente as principais características dessas ligas.

Propriedades	Liga NiTi	Liga CuZnAl
Deformação recuperável (máxima)	8%	4%
Tensão gerada na recuperação (máxima)	400 Mpa	200 Mpa
Fadiga	$10^5$ ( $\epsilon = 0,02$ ) $10^7$ ( $\epsilon = 0,005$ )	$10^2$ ( $\epsilon = 0,02$ ) $10^5$ ( $\epsilon = 0,005$ )
Resistência a corrosão	Boa	Problemática, especialmente sob tensão
Trabalhabilidade	Pobre	Razoável
Conformação	Relativamente fácil	Razoavelmente difícil

Tabela 1- Comparativo entre as ligas NiTi e CuZnAl.

Fonte: Adaptado de COURA, 2016; FUNAKUBO E KENNEDY, 1987.

Devido a disponibilidade, a liga utilizada nesse trabalho é composta por níquel-titânio (NiTi) com 0,1 mm de diâmetro, que é comercialmente chamada de Flexinol®, distribuída pela empresa Dynalloy.

O Flexinol® é um fio atuador com um diâmetro pequeno que contrai como um músculo quando acionado eletricamente (através do efeito Joule). Esse fio é menor e mais barato que motores ou solenoides, além de ser mais fácil de usar, também são capazes de realizar diversos movimentos físicos e possuem uma ampla gama de aplicações (DYNALLOY, 2019?).

As possibilidades de uso das ligas com efeito memória de forma são infinitas, uma vez que propriedades permitem resolver diversos problemas de engenharia por meio de aplicações inovadoras, que conseqüentemente resultam no desenvolvimento de novas tecnologias (TELO, 2014). Características como a grande capacidade de geração de força, alto percentual de deformação reversível, baixo ruído e dimensões reduzidas, viabilizam o uso das LMFs como atuadores (ATLI, 2013).

A aplicação de LMFs em atuadores permite o desenvolvimento de equipamentos robustos, sendo esses uma alternativa aos atuadores convencionais comumente aplicados em várias áreas da indústria (FUMAGALLI, 2009).

## 2.2 Atuadores com Memória de Forma

Mostrando um grande potencial de aplicação, as ligas com efeito memória de forma são amplamente empregadas na fabricação de atuadores, pois permitem o desenvolvimento de sistemas mais leves e com maior poder de atuação quando comparado aos convencionais (MAVROIDS, 2002). Atuadores são elementos considerados os “músculos” dos sistemas

mecânicos, pois são capazes de converter um determinado tipo de energia em outro, são empregados como fonte de movimento e força. Diversos atuadores podem ser encontrados comercialmente, enquanto outros ainda se encontram no processo de pesquisa. Comumente são dotados de motores (corrente contínua), sendo esses conhecidos como atuadores convencionais. Enquanto isso, os atuadores que possuem seu funcionamento baseado em fenômenos ligados à estrutura atômica do material, como a propriedade EMF, são chamados de não-convencionais.

Atuadores inteligentes baseados em LMF abriram um campo de possibilidades com sua facilidade de acionamento, fabricação e ótima eficiência. Esses equipamentos encontram aplicações nas mais diversas áreas, como na indústria automotiva, aeroespacial, robótica, mecânica, medicina e outras.

### *2.2.1 Atuadores com Memória de Forma na Indústria Aeroespacial*

A maioria das aeronaves em operação hoje utilizam extensos sistemas hidráulicos para o regular suas superfícies de controle. Para manter a confiabilidade e precisão desses sistemas, são empregadas várias linhas hidráulicas que devem atuar em conjunto, de forma que dificulta o uso e torna laborioso de manter. Com isso, os engenheiros e pesquisadores do setor aeroespacial vem pesquisando as ligas com memória de forma como alternativa aos sistemas hidráulicos, a fim de reduzir o peso das aeronaves, de forma que se obtenha uma redução no consumo de combustíveis, acarretando assim uma redução significativa no custo operacional, além de aumentar o tempo de voo (SENTHILKUMAR, 2012).

#### *2.2.1.1 Flaps*

*Flaps* são estruturas presentes nas asas de um avião, que são responsáveis pela mudança de direção ou perda de altitude do mesmo. Essas estruturas precisam de sistemas hidráulicos para gerar movimento, e conseqüentemente necessitam de bombas e atuadores, tornando o projeto oneroso e pesado. Para contornar esse problema, muitas pesquisas estão sendo realizadas na área de materiais procurando soluções nas LMFs (CASTILHO, 2011).

#### *2.2.1.2 Satélites*

Outra aplicação bem interessante para LMFs são nas antenas infláveis para satélites. O procedimento de ativação desse dispositivo é feito através do calor, o que viabiliza a aplicação em satélites (NOGUEIRA, 2006).

#### *2.2.1.3 Chevrons*

Nos últimos anos, os regulamentos mundiais referentes aos níveis de ruído provenientes dos motores das aeronaves se tornaram mais restritos para os processos

de pouso e decolagem (LIMA, 2017). A fim de reduzir os ruídos gerados, pesquisadores da NASA, Boeing e General Electric buscaram uma nova configuração para as turbinas dos aviões, um formato ondulado para os cantos que é denominado *chevrons*, e inseriram fitas de LMF. Com as propriedades do material com memória de forma, os *chevrons* causam perturbações nos gases que saem da turbina, reduzindo assim o nível de ruído gerado (NEGRÃO, 2012).

#### 2.2.1.4 Cryofit

*Cryofit* é um acoplamento para tubos hidráulicos de aeronaves. O primeiro modelo de *Cryofit* a utilizar LMF foi desenvolvido pela empresa *Raychem* em 1970, sendo utilizado pela indústria militar aeronáutica no caça americano *Grumman F-14* (LIMA, 2017).

No F-14 o *Cryofit* faz a união de 2 tubos distintos em uma conexão hidráulica. Inicialmente o acoplamento é imerso em nitrogênio líquido, fazendo com que seu diâmetro seja alargado mecanicamente até a sua montagem no sistema hidráulico. Após essa etapa, o acoplamento é montado rapidamente nas extremidades das tubulações que serão unidas. Quando retorna a temperatura ambiente, esse acoplamento recupera seu menor diâmetro, apertando com grande força as extremidades dos tubos, criando assim uma junta que é costumeiramente superior as juntas soldadas (HODGSON, 2000).

#### 2.2.1.5 Asas Morfológicas

Também são pesquisadas aplicações de LMFs nas asas dos aviões, como no caso das asas morfológicas, que são asas que possuem a capacidade de melhorar ou adaptar a geometria do seu perfil aeronáutico durante o voo, otimizando seu desempenho (SOFLA, 2010). Esse modelo de asa vem sendo estudado para empregar em veículos aéreos não-tripulados (VANTs) de pequeno porte. Através de sistemas antagônicos de atuação para flexão com LMF, a asa é capaz de executar tanto movimentos de flexão quanto de torção (SANTOS, 2015).

## 3 | METODOLOGIA

Para realizar as avaliações das propriedades do material (liga NiTi com EMF) construiu-se uma bancada experimental pensada de forma que atendesse aos ensaios previstos para a avaliação da liga. No projeto da bancada considerou-se as dimensões necessárias para realizar três ensaios simultâneos.

Os ensaios realizados foram:

1. Deformação permanente ao final de 15.000 ciclos de uso;
2. Deformação de acionamento em função da carga aplicada;
3. Ciclos para chegar à ruptura.

Durante a parte de projeto houve um levantamento do que seria necessário na bancada para realizar os ensaios. Com base nesses levantamentos buscou-se utilizar materiais disponíveis na universidade a fim de se reduzir os custos. Sendo os materiais disponíveis metalon 20 mm por 20 mm, placas de madeira (MDF), e barra de aço para as cargas.

Após a construção da bancada de teste mostrada na figura 1 alguns testes iniciais foram realizados para saber qual é a corrente máxima na qual o fio romperia, durante uma carga constante (sendo essa produzida a partir de barras de aço cortadas em tamanhos distintos) de 0,065 kg, 0,256 kg e 0,375 kg. Para cada carga, o procedimento consistiu na aplicação de corrente 0,2A no fio e medir o seu deslocamento com um paquímetro digital e uma régua para auxiliar na medida, em seguida, a corrente foi aumentada gradualmente até 0,6A, ou a ruptura do fio.

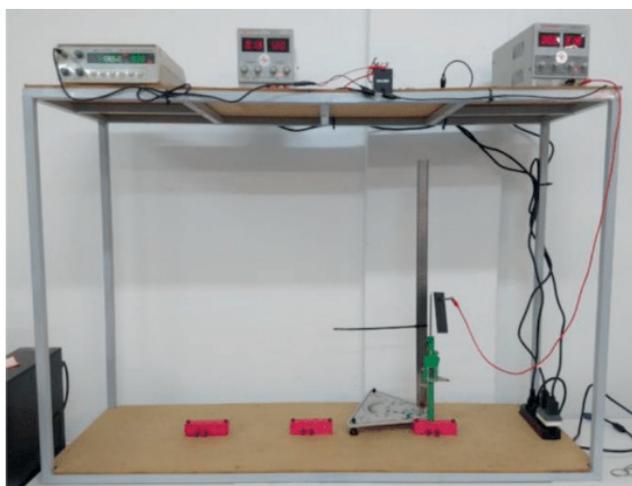


Figura 1 – Bancada experimental com os aparatos eletrônicos montados.

Fonte: O autor.

Os ensaios cíclicos foram definidos da seguinte forma: 2 segundos para o acionar e 2 segundos para desativar, utilizando uma função modelo gerador GV-2002 (ICEL), uma fonte de alimentação modelo ST-305D (INSTRUTEMP), definido como 0,2 A e um sistema electrónico alimentado por uma fonte ITFA 5000 (INSTRUTEMP). O número de ciclos foi contado por meio de um contador analógico, até t. O deslocamento do fio (com comprimento inicial de 50 cm) foi medido antes do início do teste e após 15.000 ciclos, utilizando um paquímetro digital de 300 milímetros com 0,01 milímetros resolução e uma régua de 50 cm para auxiliar na medida.

A figura 2 mostra o fio na condição relaxada, já a figura 3 mostra na condição

disparada. Além disso, o deslocamento foi medido no final do fio antes da sua ruptura. Cada teste foi conduzido sob uma corrente contínua, que foi gradualmente aumentada até 0,2A, a fim de minimizar problemas com a deformação da microestrutura do material, tal como sugerido por Casati e colaboradores (CASATI et al., 2011).



Figura 2 – Fio relaxado.

Fonte: O autor.



Figura 3 – Fio acionado.

Fonte: O autor.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa do projeto foi constituída de uma atividade mais braçal, como o levantamento de informações, projeto e construção do aparato experimental para a realizar os testes do material estudado.

A tabela2 apresenta os resultados de retração do comprimento do fio mediante a aplicação de uma corrente de 0,2 A, por uma média de 30 segundos, quando suportando cargas de 0,065kg, 0,256kg e 0,375kg.

Teste	Retração (mm)		
	Carga 0,065 kg	Carga 0,256 kg	Carga 0,375 kg
1	21,1150	16,9100	15,2900
2	19,2900	18,7250	16,0350
3	19,2500	18,6750	15,4700
4	19,3350	18,5850	15,5750
5	19,5250	18,1100	15,6500
6	18,6300	18,9650	14,7000
7	18,0050	18,9150	14,5750
8	18,6200	19,2950	15,2950
9	17,7600	18,7000	14,9900
10	19,1150	18,5700	15,7650
<b>Média ± Desvio Padrão (mm)</b>	19,0645 ± 0,9302	18,5450 ± 0,6510	15,3345 ± 0,4659

Tabela 2 - Retração do comprimento do fio para as cargas de 0,065 kg, 0,256 kg e 0,375 kg.

Comprimento inicial de 50 cm.

Fonte: O autor.

Os dados apresentados na tabela 2 mostram que a capacidade de contração do fio diminui à medida que a carga aumenta. Este comportamento já era esperado, uma vez que o trabalho feito por fio aumenta com a carga. Foi observado que o fio rompe com uma corrente de 0,6 A, em média, confirmando os resultados obtidos por Benites (2018).

Observou-se que o comprimento do fio aumentou em relação ao comprimento inicial, e que o mesmo passou por uma deformação plástica quando submetido a uma corrente elevada (0,6 A) por um longo período (em média, 2 minutos). O fio foi aquecido próximo a sua corrente máxima de ruptura (0,6A) e mantido nesta condição por um tempo médio de 2 minutos, a fim de verificar se ele perderia ou não sua propriedade EMF. Ao longo de todos os testes o fio foi deformado plasticamente, aumentando o seu comprimento e quando a corrente aplicada é desligada, o material não retornava ao seu tamanho original. Além disso, depois de estar mais uma vez sujeito a uma 0,2 A, o fio apresenta uma perda do seu efeito memória de forma. De acordo com Dynalloy (2015) a deformação permanente ocorre se o fio é sujeito a uma tensão elevada e a alta temperatura. Deste modo, supõe-se que esses limites foram alcançados quando foram aplicadas uma carga de 0,256 kg e uma corrente de 0,6 A ao fio estudado, levando-o à ruptura.

Para os testes de cíclicos com as três cargas (0,065 kg, 0,256 kg e 0,375 kg), não havia nenhuma deformação plástica após 15.000 ciclos estipulados, confirmando a previsão da fabricante (Dynalloy, 2015). No entanto, observou-se que, se o fio está em

contato com a parede da bancada, ele rompe ocorre a menos de 15.000 ciclos, levando ao entendimento de que um ponto de contato induz uma concentração de tensões.

De acordo com o dimensionamento realizado por Benites (2018) na tabela 3 e demonstrado na figura 5, considerando as forças requeridas pelo sistema de atuadores da asa para que esses possam trabalhar, a autora demonstra qual é, teoricamente, a carga média que o material deve suportar.

DADOS GERAIS	
Ângulo do <i>flap</i> (°)	$\theta = 0$ até $90$
Ângulo do fio SMA em relação a força $F_{ns}$ (°)	$\alpha = 90 - \theta$
Velocidade do ar 1 (m/s)	$V_{k=1} = 15$
Velocidade do ar 2 (m/s)	$V_{k=2} = 30$
Densidade do ar (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = 1,3$
Aplicação da força $F_n$ no centro do <i>flap</i> (m)	$D_1 = 0,0075$
Aplicação da força $F_{ns}$ a 1/3 da distância da aplicação de $F_n$ (m)	$D_2 = 0,005$
Comprimento do <i>flap</i> (m)	$0,210$
Largura do <i>flap</i> (m)	$0,015$
Área do <i>flap</i> (m <sup>2</sup> )	$A = 0,00315$
MODELAGEM MATEMÁTICA	
Cálculo da Força Normal no centro do <i>flap</i> (N)	$F_n = \rho * A * V_k^{2*} \text{sen}^2(\theta)$
Cálculo da Força normal do fio na distância $d_2$ (N)	$F_{ns} = (F_n * D_1) / D_2$
Cálculo da componente da Força $F_{ns}$ na direção x (N)	$F_{nst} = F_{ns} * \text{cos}(\alpha)$

Tabela 3 - Dados utilizados para o dimensionamento de um sistema utilizando ligas com memória de forma em VANTS.

Fonte: Benites, 2018.

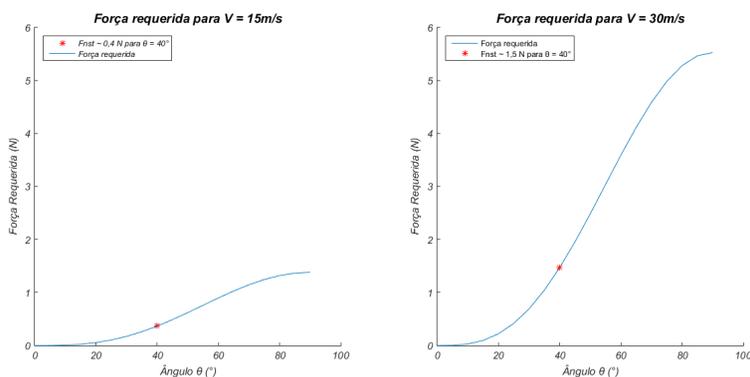


Figura 5 – Gráfico de Força Requerida x Ângulo  $\theta$  de deflexão do *flap* para velocidade do ar de  $V_1$  e  $V_2$ .

Fonte: Benites, 2018.

Ao analisar os gráficos de Benites (2018) observa-se que, para o ângulo máximo de deflexão no *flap* ( $\theta = 40^\circ$ ), conforme mencionado pela autora, a força máxima requerida para as duas velocidades são de 0,4 N e 1,5 N. Ao se basear nessas informações, levando em consideração os pesos utilizados para os ensaios (0,64 N, 2,51 N e 3,68 N) e a temperatura de trabalho do material (70°C), que possui um valor acima da temperatura ambiente onde se opera um VANT, pode-se afirmar que o material em questão é aplicável para a construção de sistemas de controle de pequeno porte.

## 5 | CONCLUSÕES

Os resultados finais confirmam a corrente 0,2 A para a ativação da liga com memória de forma, de acordo com a informação fornecida pelo fabricante. O material tem potencial para aplicações como atuador, uma vez que o número de ciclos não influencia em seu comprimento. Além disso, estabeleceu-se que uma corrente de até 0,6 A pode ser aplicada no fio antes que ocorra ruptura sob o efeito de uma carga constante. A deformação plástica permanente pode ocorrer em condição severa de carga e temperatura, a última em função de uma corrente crítica aplicada. Além disso, após submetido a uma corrente próxima ao seu valor crítico (0,6 A) por um período de aproximadamente 2 minutos o fio perde seu efeito memória de forma, não recuperando sua forma original quando exposto a uma corrente de ativação de 0,2 A. Finalmente, outra questão a ser levada em consideração é a parte construtiva do sistema no qual irá se utilizar o fio, uma vez que nos testes o fio rompeu prematuramente devido ao atrito entre o fio e a bancada.

## REFERÊNCIAS

AEROFIT. **Couplings - Cryofit**. [2019?]. Disponível em: < <http://www.aerofit.com/sma-cryofit-couplings/>>. Acesso em: 21 mar. 2019.

ATLI, K., C. et al.. **The effect of training on two-way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys**. Materials Science and Engineering: A, v. 560, p. 653-666. 2013. Elsevier BV.

BENITES, M. A. C. et al. **Estudo da utilização de ligas com efeito memória de forma como atuadores em aeronaves não tripuladas**. X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2018. Salvador, Brasil.

BUEHLER W. J.; WANG F. E. **A summary of recent research on the Nitinol alloys and their potential application in ocean engineering**. Ocean Eng. 1, pp. 105-120. 1967.

CASTILHO, W. S.; SILVA, E. P. **Algumas aplicações das ligas com memória de forma**. Revista Científica do Instituto Federal de São Paulo – Sinergia, v. 12, p. 99-108, 2011.

COURA, E. A. N. **Estudo da aplicação da liga NiTi com efeito memória de forma em atuadores de aeronaves**. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

DIAS, R. F. **Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica**. 158 f. Tese (Doutorado) – Curso de Metalurgia e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

DYNALLOY. **Technical characteristics of FLEXINOL® actuator wires**. [2019?]. Disponível em: < <http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf> >. Acesso em: 21 mar. 2019.

FUMAGALLI, L.; BUTERA, F.; CODA, A. **SmartFlex® NiTi Wires for Shape Memory Actuators**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 18, n. 5-6, p. 691-695. 2009. Springer Nature.

FUNAKUBO, H.; KENNEDY, J. B. (Ed.). **Shape Memory Alloys**. Tokyo: Gordon and Breach Science Publishers, 1987. V. 1. (Precision Machinery and Robotics).

GRENINGER, A. B.; MOORANDIAN, V. G. **Strain Transformation in Metastable Beta Copper-Zinc and Beta Copper-Tin Alloys**. AIME TRANS 128 (1938), pp. 337-355.

HODGSON, D. E.; BROWN, J. W. **Using Nitinol Alloys**. Shape Memory Applications. California, 2000.

KURDJUMOV, G.; KHANDROS, L. **First reports of the thermoelastic behaviour of the martensitic phase of Au-Cd alloys**. Doklady Akademii Nauk SSSR 66 (1949), pp. 221-213.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications**. New York, USA: Springer, 2008. 446 p. (ISBN 978-0-387-47684-1).

LIMA, W. M. **Caracterização termomecânica de um fio atuador de liga com memória de forma de Ni-Ti**. 200 f. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

MAVROIDIS, C. **Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids**. Research in Nondestructive Evaluation, v. 14, pp. 1-32. 2002. Springer-Verlag.

NEGRÃO, G. Q. **Análise de uma máquina para conversão termomecânica de energia baseada em ligas com memória de forma**. 70 f. Dissertação (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Brasília, 2012.

NOGUEIRA, C. M. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras curtas com efeito memória de forma**. 144 f. Tese (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

OLIVEIRA, C. A. N. **Caracterização termoelástica de atuadores helicoidais da liga Cu-Zn-Al com memória de forma**. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

OTSUKA, K; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1998. 294 p. (ISBN 0-521-44487-X).

RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. New York, USA: Springer, 2015. 137 p. (ISBN 978-3-319-03187-3).

SANTOS, J. M. **Atomização e consolidação por fusão seletiva a laser da liga Cu-11, 3Al-3, 2Ni-3, 0Mn-05Zr com efeito memória de forma.** 63 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, 2015.

SETHILKUMAR, M. **Analysis of SMA Actuated Plain Flap Wing.** Journal of Engineering Science and Technology Review, 2012. n. 1, v. 5. p. 39-43.

SOFLA, A. Y. N. et al. **Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges.** Materials & Design. 2010. n. 3, v. 31. p. 1284-1292.

TELO, G., J., C. **Estudo de um actuador baseado em ligas com memória de forma.** 87 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014.

# CAPÍTULO 3

## APLICAÇÃO DE UM MECANISMO BALANCE BAR A UM SISTEMA DE FREIO DE UM VEÍCULO OFF ROAD DO TIPO BAJA

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 05/02/2021

### Gustavo da Rosa Fanfa

Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Rio Grande - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/1048975400703509>

### Bruno Almeida Nunes

Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Rio Grande - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/5843415214640508>

### Antonio Domingues Brasil

Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Rio Grande - Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/9735292585423998>

**RESUMO:** O presente projeto de pesquisa parte de um problema encontrado durante a modelagem e dimensionamento do sistema de freios de um veículo *off road* do tipo baja. O projeto e a fabricação devem seguir estritamente o regulamento estabelecido pela associação SAE Brasil. Tal regulamento impõe que os protótipos devem ter duas linhas independentes de freio, uma para as rodas dianteiras, e outra para as rodas traseiras. Durante o desenvolvimento do sistema, foi percebida a necessidade de ajuste de pressões relativas nas duas linhas de freio. Para solucionar o problema, optou-se pela aplicação de um mecanismo já conhecido, o *balance bar*, que, tendo em vista conceitos de engenharia, confiabilidade e robustez do sistema, atende os requisitos iniciais de aplicação. A partir daí,

foi realizado a modelagem, dimensionamento em software de modelo CAD que proporcionou a realização de uma análise quantitativa da variação esperada. Além disso, foram realizadas simulações estruturais por elementos finitos, visando validar a produção do mecanismo em âmbito de protótipo. O mecanismo foi produzido em máquinas e ferramentas mecânicas convencionais utilizando alumínio e aço. Os requisitos de variação de pressão eram de 70% para ambas as linhas. O desenvolvimento da aplicação do mecanismo resultou em uma variação possível superior às necessárias, se aproximando de 80%. O ajuste do mecanismo não requer uso de ferramentas e equipamentos específicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Off Road*; baja; freios; *balance bar*; variação.

### APPLICATION OF A BALANCE BAR MECHANISM TO A BREAK SYSTEM OF A BAJA TYPE OFF ROAD VEHICLE

**ABSTRACT:** This research project is part of a problem encountered during the design and modeling of the brake system of an off road vehicle of the baja type. The vehicle obeys a regulation for its production, which is given by the SAE Brasil association, that forces the prototypes to have two independent brake lines, one for the front wheels, and another for the rear wheels. During the development of the system in general, it was perceived the need to adjust the relative pressures in the two brake lines. To solve the problem, we aimed to apply an already known mechanism - the balance bar mechanism which,

in view of engineering concepts, reliability and robustness of the system, meets the initial application requirements. From there, the modeling was carried out, sizing in CAD model software that provided a quantitative analysis of the expected variation. In addition, structural simulations were performed by finite elements, in order to validate the production of the mechanism within the prototype. The mechanism was produced in conventional machines and mechanical tools using aluminum and steel. The pressure variation requirements were 70% for both lines. The development of the mechanism application resulted in a possible variation higher than those required, approaching 80%. The adjustment of the mechanism does not require the use of specific tools and equipment.

**KEYWORDS:** Off Road, baja; brakes; balance bar; variation.

## 1 | INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi concebido, projetado, fabricado e testado na equipe FURG Motorsport, do projeto baja da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, na cidade de Rio Grande, Rio Grande do Sul. Trata-se de um projeto extracurricular, com o objetivo de desenvolver um veículo do segmento fora de estrada (*off road*) para o mercado consumidor mundial, propiciando a condição de participar das competições universitárias promovidas pela associação de engenheiros da mobilidade, SAE Brasil. As referidas competições desafiam estudantes de engenharia a desenvolverem um protótipo, englobando a concepção, o projeto, a construção e os testes. Especificamente este trabalho tem o intuito de apresentar como foi resolvido um problema de dinâmica de frenagem, onde se fazia necessária a variação e regulagem da pressão atuante nas linhas de freio do protótipo a ser fabricado. O sistema de freios do veículo é de suma importância para as provas de segurança da Competição Baja SAE e, sobretudo, para promover confiança e segurança durante a pilotagem, requerendo destaque e dedicação desde a concepção do projeto. O protótipo da equipe citada requisita, por sua dinâmica, a variação aproximada de 70% de pressão nas linhas, o que desafia a criação de um mecanismo que realize essa variação. Além disso, por se tratar de um veículo de competição e comercial, a massa empregada, facilidade de ajuste e manutenção e o custo são fatores cruciais que devem ser levados em consideração durante seu desenvolvimento.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Requisitos do regulamento da competição baja SAE

De acordo com a SAE (2021), algumas regras são impostas aos veículos tipo baja, a fim de garantir a segurança e os requisitos básicos de produção. Para os freios, essas normas podem ser encontradas no Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil (RATBSB) parte B – Regulamento técnico, B9 – Sistema de freio. Esse projeto foi realizado com base nas diretrizes técnicas prescritas em tal regulamento. Dentre as diretrizes

técnicas vale citar o item B9.2.1.

O sistema de freios deve ser segregado em ao menos dois circuitos hidráulicos independentes de tal forma que, mesmo com qualquer falha ou vazamento em um ponto do sistema, a capacidade de frear efetivamente seja mantida em pelo menos duas rodas. (SAE BRASIL, 2021, p. 72)

## 2.2 Mecanismos de frenagem

Desde a criação da roda, a necessidade de desenvolver mecanismos de frenagem tornou-se crucial para o desenvolvimento humano. A física e a engenharia sempre se fizeram presentes nesse desenvolvimento, e desde lá, diversos mecanismos distintos foram criados. Atualmente, o mecanismo de maior eficiência, segundo Limpert (1999), é conhecido como sistema de freios a disco, presente também no protótipo baja SAE.

Segundo Limpert (1999), este sistema consiste em um disco, montado no eixo e fixado ao cubo da roda. A frenagem do disco é realizada por meio de uma pinça presa ao cubo. Este sistema, embora mais eficiente, é normalmente usado apenas nos eixos dianteiros de veículos comuns.

## 2.3 Multiplicação de força e princípio de Pascal

De acordo com Nicolazzi (2008), a frenagem em veículos automotores é feita através de dois princípios básicos: multiplicação mecânica e pressão. A multiplicação mecânica é feita via pedal de freio. Isso se torna indispensável, pois segundo Limpert (1999) a força exercida no pedal limita-se em 823N para os homens e 445N para as mulheres, fazendo-se necessária a multiplicação dessa força, função essa exercida pelo pedal de freio. A multiplicação mecânica, nesse caso, acontece via alavanca interfixa, podendo ser exemplificada pela Figura 1.

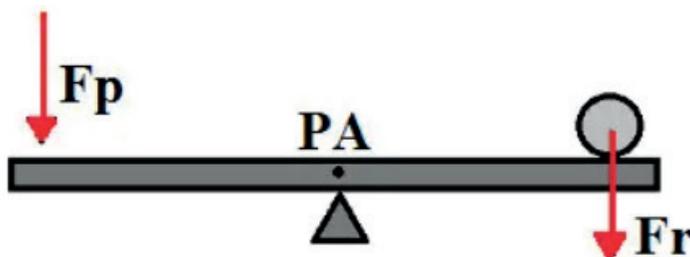


Figura 1 - Alavanca Interfixa

Fonte: Teixeira (2021)

O segundo conceito empregado para multiplicação mecânica trata-se da pressão, conhecido fisicamente como Princípio de Pascal, no qual, considerando um fluido incompressível, a pressão exercida em toda a linha será a mesma.

De acordo com Limpert (1999), o Princípio de Pascal, onde, num sistema fechado, quando uma força atua numa determinada área de um pistão, comprimindo um fluido, esta é multiplicada proporcionalmente à área do segundo ou demais pistões do sistema.

A relação de multiplicação de força relacionada com a área e descrita por Limpert (1999) pode ser representada na figura 2.

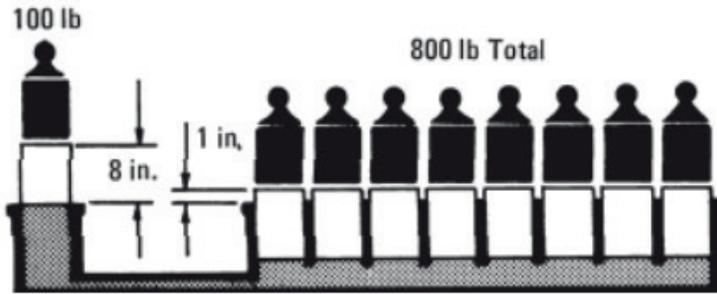


Figura 2 - Relação de multiplicação de força com a área

Fonte: Limpert (1999).

## 2.4 Princípio de atrito

O projeto de um mecanismo específico demanda a aplicação de diversos princípios e teorias. No caso de um sistema de freios, há um princípio físico fortemente presente e fundamental que é o Princípio de Atrito, conforme descrito por Nicolazzi (2008).

A possibilidade de transmissão de esforços entre o pneu e a pista, esforços esses que ocorrem durante os processos de frenagem e aceleração ou quando da absorção de forças laterais, como a força centrípeta em curvas, depende do atrito disponível no contato, também chamado aderência entre pneu e pista. (NICOLAZZI, 2008, p. 15)

A aderência entre pneu e pista é de suma importância para maior performance e segurança durante a frenagem. Portanto, conhecer a influência dos diferentes tipos de terrenos na dinâmica de frenagem possibilita um ajuste preciso de pressões de freios, facilitando a pilotagem. Para o conhecimento citado, NICOLAZZI (2008) disponibiliza a tabela abaixo, ilustrada na figura 3, onde apresenta grandezas de coeficiente de atrito para os diversos tipos de terreno.

Tipo de pista	$\mu$
Asfalto	0,60 a 0,95
Pedra britada	0,50 a 0,65
Terra solta	0,40 a 0,50
Terra seca	0,50 a 0,70
Terra úmida	0,50 a 0,60
Areia	0,20 a 0,30
Neve	0,30 a 0,35

Figura 3 - Variação do coeficiente de atrito de acordo com o tipo de terreno

Fonte: Nicolazzi (2008).

Então, para cada mudança de constante de atrito ( $\mu$ ) relacionada a diferentes tipos de terrenos, veículos de competição, como o Baja SAE, são beneficiados por um ajuste preciso das pressões atuantes nas linhas de freio.

### 3 | METODOLOGIA

O presente trabalho pode ser caracterizado como uma pesquisa quantitativa, descritiva e aplicada. Quantitativa na medida em que faz uso de linguagem matemática e lógica, associadas com teorias de frenagem veicular, próprias da engenharia, relacionando-as de forma a encaminhar uma solução para o problema identificado. Considerando o que foi escrito por Triviños (1987) apud Biz, Gomes e Brasil (2019), esta pesquisa também tem um perfil descritivo e aplicado, pois procura identificar e descrever variáveis, fatos e fenômenos próprios do caso analisado, além de possibilitar geração de conhecimentos para uso em pesquisas futuras afins com a dinâmica veicular.

Os procedimentos que orientaram a obtenção de uma solução para o problema, foram conduzidos de acordo com a sequência exposta a seguir.

Inicialmente foi realizada uma análise sobre a questão central do problema, qual seja: como realizar a variação e a regulagem da pressão atuante nas linhas de freio do protótipo a ser fabricado. Como meta inicial, estudos dinâmicos anteriores realizados pela equipe indicavam que a performance do protótipo teria uma melhora significativa, se fosse possível obter uma variação de pelo menos 70% da pressão nas linhas de freio.

Tendo essa referência como ponto de partida, pesquisas bibliográficas e coleta de dados de protótipos anteriores foram efetuadas, tendo o fim de obter informações para auxiliar na concepção de um sistema, que viabilizasse a regulagem da pressão nas linhas de freio.

Nessa etapa inicial, foram levantados requisitos gerais e restrições que condicionariam as alternativas funcionais para o novo sistema. Como requisitos gerais

citam-se a necessidade do sistema ter baixo custo, facilidade de produção e manutenção. Como restrições destaca-se aquelas de cunho espacial, na medida em que as dimensões do novo sistema ficariam condicionadas ao espaço disponível no chassi do veículo. Além disso, por se tratar de um veículo de competição, a massa empregada que se reflete no peso do conjunto é outro fator que teve que ser levado em consideração. Outro fator condicionante para o projeto foi o dimensionamento do sistema de freios do veículo, realizado previamente, em que ficou definida a utilização de dois cilindros de freio (um para as rodas dianteiras e outro para as traseiras).

Uma vez tendo-se as informações fundamentais para apoiar as decisões, a próxima etapa foi levantar alternativas de soluções para o sistema.

A alternativa de modelar o sistema a partir do uso de um mecanismo *Balance Bar* (barra de equilíbrio) surgiu a partir de pesquisas bibliográficas e estudos em veículos de competições nacionais e internacionais. *Balance bar* nada mais é do que uma barra de ajuste, que promove a variação do ponto de aplicação da força, variando assim, a pressão relativa atuante em cada uma das linhas de freio.

A simplicidade do sistema e sua compatibilidade com os requisitos e restrições de projeto foram decisivos para a sua escolha.

Estando definido o sistema a ser usado, a etapa seguinte foi a elaboração do seu projeto técnico, o que envolveu: concepção do sistema (geometria geral e suas partes constituintes); levantamento dos esforços atuantes; simulações estruturais; seleção de materiais; dimensionamento e especificação de componentes; modelagem gráfica do mecanismo; elaboração de desenhos construtivos.

A aplicação desse procedimento metodológico culminou com a obtenção de um mecanismo que atendeu satisfatoriamente às expectativas da equipe e que passa a ser descrito a seguir.

## 4 | PROJETO DO MECANISMO

A decisão pela adoção do mecanismo *Balance Bar* e o trabalho anterior da equipe de dimensionamento do sistema de freios do veículo, onde foram determinados dois cilindros de freio (um para as rodas dianteiras e outro para as traseiras), definiram os marcos iniciais para a concepção do mecanismo.

Uma primeira decisão para iniciar o dimensionamento do sistema foi a escolha da razão C do pedal (Figura 5), ou seja, a relação entre o braço de alavanca do pedal (B) e o braço de acionamento do mecanismo (A).

Segundo Junior (2015) um ser humano não consegue fornecer toda a força necessária para que a frenagem seja efetuada. Para tal é necessário ampliar essa força, fato que ocorre no pedal de freio por meio da força de alavanca. Como o protótipo deve ser concebido para o mercado consumidor mundial, o sistema de freio precisaria ser eficaz

para uma força no pedal de 445 N, que, segundo Limpert (1999), é a maior força que pode ser exercida pelo público feminino.

De posse desse dado, chegou-se à conclusão de que a razão do pedal mínima para acionamento do sistema deveria ser 7.

A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do pedal e de sua razão de pedal (C). Como já citado anteriormente, neste projeto a razão necessária é de 7, que resultou na força aplicada no mecanismo *balance bar*, desconsiderando perdas, equivalente a 3115 N.

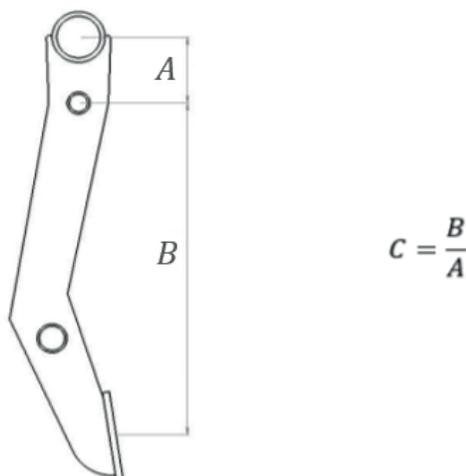


Figura 4 - Representação de modelo de pedal

Fonte: adaptado de MARTINS NETO (2018).

Com esses dados iniciais foi feito um diagrama de corpo livre, onde constam os esforços que atuarão no mecanismo, conforme Figura 5. Como pode ser visto, a distribuição dos esforços no mecanismo pode ser modelada como uma viga biapoiada com carregamento simples. Alterando-se o ponto de aplicação da força amplificada (3115 N), alteram-se as reações dos apoios A e B, que representam as forças que agem nos cilindros hidráulicos. O mecanismo *balance bar* tem por objetivo ajustar a localização dessa força. No mecanismo projetado, a faixa de ajuste é de 55 milímetros. Esse valor foi decorrente das limitações de espaço impostas pelo chassi do veículo.

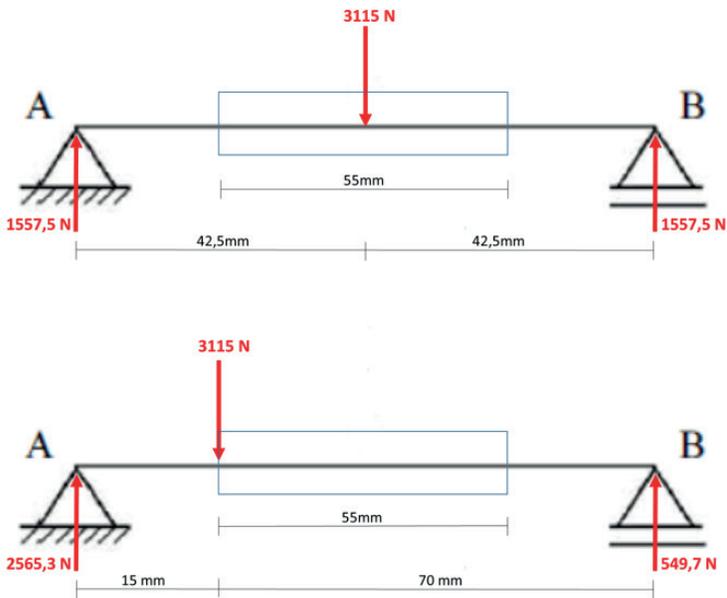


Figura 5 – Modelagem dos esforços no *Balance Bar*

Fonte: os autores (2021).

A modelagem dos esforços permitiu o entendimento de como seria o funcionamento básico do sistema e das principais grandezas que influenciariam a sua geometria. Após, utilizando um software de modelo CAD, chegou-se à primeira concepção do mecanismo, que está apresentada na Figura 6.

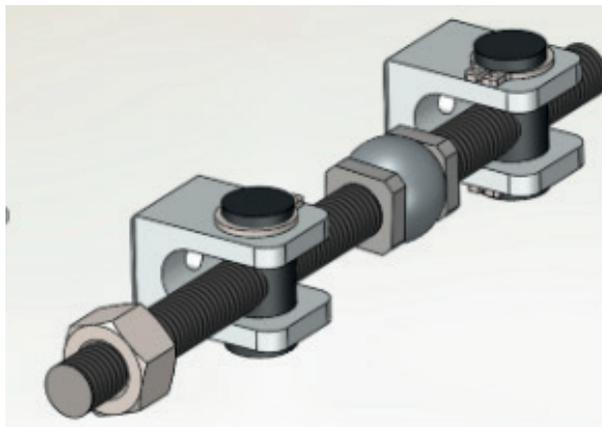


Figura 6 – Primeira versão da concepção do *Balance Bar*

Fonte: Os autores

Com a concepção e os parâmetros iniciais de projeto definidos, foi possível pesquisar e selecionar materiais para serem usados na fabricação. Os materiais selecionados foram submetidos às análises de esforços, por meio de simulações em softwares de elementos finitos. A Figura 8 mostra a simulação feita em um dos componentes do mecanismo. Os materiais escolhidos foram o alumínio SAE 6061-T6 e o aço SAE 1045, que apresentam propriedades mecânicas adequadas para suportar com segurança às solicitações e facilmente encontrados no mercado.

Uma vez escolhidos os materiais e definidos os componentes que fariam parte do mecanismo, fazendo uso novamente de um software de modelo CAD, foram aprimoradas dimensões e formas geométricas. Paralelamente, foram especificados os componentes comerciais que seriam adquiridos de terceiros. Para finalizar o projeto do mecanismo, foram elaborados os desenhos construtivos necessários para a fabricação do mesmo.

## 5 | DESCRIÇÃO DO MECANISMO PROJETADO

A Figura 6 apresenta um desenho esquemático em perspectiva do mecanismo *Balance Bar* que foi projetado. Como pode ser observado, ele é composto por 6 componentes: manípulo de ajuste; barra rosca; pino de apoio (duas peças); mancal de sustentação (duas peças); cursor de regulagem; bucha fixa; anel de trava (duas peças).

O seu funcionamento se dá do seguinte modo: conforme pode ser acompanhado pela Figura 7, ao girar-se o manípulo de ajuste, o cursor de regulagem de pressão se deslocará para um dos lados, conforme o sentido de giro, e irá alterar o ponto de transmissão de força do pedal aos cilindros hidráulicos, variando assim a pressão exercida no fluido de freio pelo êmbolo de cada cilindro.

Os anéis trava têm a função de fixação dos pinos de apoio em seu respectivo mancal de sustentação, sendo que cada pino tem um orifício com rosca para deslizamento da barra rosqueada, garantindo o ajuste necessário para transmissão dos esforços.

Os mancais de sustentação são os elementos de ligação com os cilindros hidráulicos. Já a bucha fixa é o elemento que liga o mecanismo ao pedal de freio.

O peso total do mecanismo ficou em 0,5 kgf, sendo de fácil montagem e manutenção, atendendo assim aos requisitos inicialmente estabelecidos.

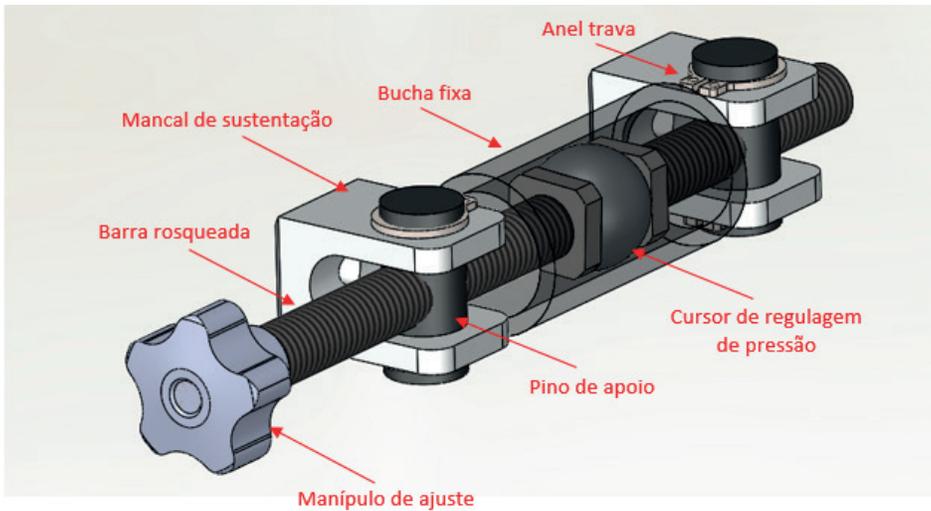


Figura 7 - Modelagem

Fonte: os autores (2021)

Objetivando proporcionar robustez e confiabilidade ao mecanismo, foram realizadas simulações estruturais por elementos finitos validando assim a geometria empregada, como já citado anteriormente. As tensões máximas encontradas em ambos os materiais - aço e alumínio - ficaram abaixo da metade de sua tensão de escoamento, proporcionando ao sistema um fator de segurança igual ou superior a 2. A Figura 8 exemplifica o modelo de simulação utilizada, proporcionando não só o conhecimento da localização de maior solicitação, mas também as deformações presentes nos componentes.

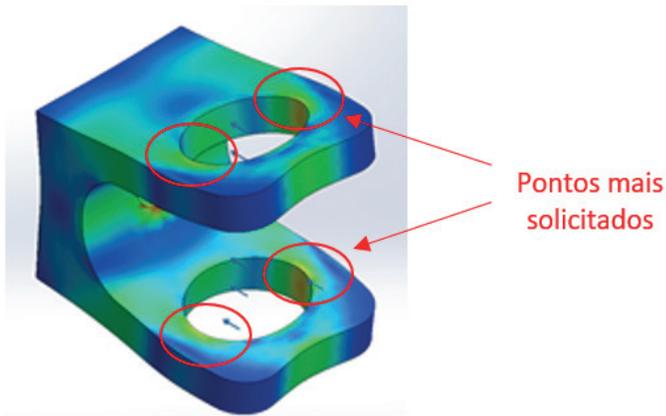


Figura 8 - Simulação Estrutural

Fonte: os autores (2021).

Um dos fatores limitantes para a geometria do sistema seria a movimentação da força atuante. A solução encontrada foi fabricar uma bucha acompanhada de um cursor de regulagem interna em conjunto com uma barra rosqueada. O curso de movimentação da bucha ficou em 55 milímetros, pois este era o limite de espaço disponível para a montagem dos dois cilindros hidráulicos. Com o ajuste na barra rosqueada, ao se aplicar uma força de 445N, as pressões resultantes nos cilindros podem variar de 20 a 90 bares. Para validar e regular o sistema, foram utilizados manômetros analógicos, permitindo o ajuste preciso e consequentemente possibilitando ao veículo travar as 4 rodas imediatamente e em terrenos distintos, conforme exigência do regulamento da competição. Visando reduzir o custo de produção, a geometria criada teve como base a possibilidade de fabricação por equipamentos e ferramentas acessíveis ao cotidiano da equipe FURG Motorsport, reduzindo assim, além do custo, o tempo e logística de fabricação. O sistema montado no veículo encontra-se na Figura 9.

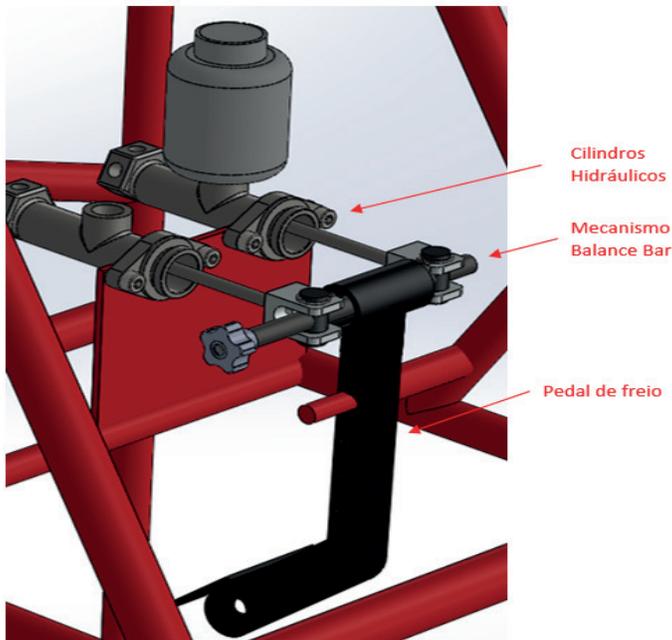


Figura 9– Sistema montado  
Fonte: os autores (2021).

## 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A competição BAJA SAE testa e avalia o veículo em diversos aspectos, dentre eles, segurança e resistência são os que mais impactam na qualificação de um equipe.

Portanto, a estratégia de possuir um sistema seguro e bem testado garantem à equipe um bom rendimento durante as provas. O projeto propiciou à equipe a possibilidade de ajustes de parâmetros para diferentes tipos de terrenos, melhorando a performance do veículo durante as competições. Testes de campo ainda serão necessários para aprimorar os ajustes do sistema, com relação às perdas não consideradas neste projeto de aplicação. Cabe salientar, ainda, que um dos limites do sistema desenvolvido é que ele necessita ser ajustado previamente para o terreno onde o veículo irá competir. Em projetos futuros, cabe o desenvolvimento de um ajuste eletrônico, o que beneficiaria ainda mais a regulação dos parâmetros de veículo durante uma competição.

## REFERÊNCIAS

BIZ, P. M.; GOMES, L. C. ; BRASIL, A. D. **OTIMIZAÇÃO DA ESCOLHA DA RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA: O PROJETO BAJA SAE**. Impactos das Tecnologias na Engenharia Mecânica 2. 2 ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, v. 2, p. 146-156.

BRASIL, SAE BRASIL. **Baja.– s.d.** – Disponível em: [http://saebrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/03/RATBSB\\_emenda\\_03.pdf](http://saebrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/03/RATBSB_emenda_03.pdf) . Acesso em: 01 fevereiro 2021. SAE BRASIL. Regulamento Baja SAE Brasil: Capítulo B 9.

GILLESPIE, T. **Determining the Sensitivies of an S-Cam Brake**. Technical Report. Blue Springs - USA: 1998.

MARTINS NETO, E. P. P. **PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FREIO APLICADO A UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO PARA COMPETIÇÃO FORA DE ESTRADA** - João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13326/1/EPPMN03072018.pdf>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2021.

NICOLAZZI, L.C.; LEAL L.C.M.; ROSA, E. **Uma introdução a modelagem quaseestática de automóveis**. Publicação interna do GRANTE, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. 2008.

JUNIOR, N.M.J. **Dimensionamento de um freio para baja**. Trabalho de conclusão de curso. Santo André: FATEC. 2015.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**. Second Edition. SAE International. 1999.

TEIXEIRA, M. M. **Alavanca**; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilestela.uol.com.br/fisica/alavanca.htm>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2021.

## DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO ALTERNATIVO PARA APROVECHAR LA ENERGÍA POTENCIAL DEL AGUA

*Data de aceite: 01/03/2021*

### **Diógenes Manuel de Jesús Bustan Jaramillo**

Tecnología Superior en Mecánica Industrial  
Instituto Superior Tecnológico Daniel Álvarez  
Burneo  
Loja – Loja – Ecuador

### **José Leonardo Benavides Maldonado**

Facultad de Ingeniería Electromecánica  
Universidad Nacional de Loja  
Loja– Loja – Ecuador

### **Andrea del Pilar Narváez Ochoa**

Tecnología Superior en Procesamientos  
Alimentos-Instituto Superior Tecnológico Daniel  
Álvarez Burneo  
Loja – Loja – Ecuador

**RESUMO:** O aproveitamento da energia potencial da água, é a transformação energética que se realiza convertendo a mesma em energia mecânica rotacional e esta por sua vez, em diferentes tipos de energia. Podendo adaptar eixos e rodas hidráulicas e turbinas, e converter a energia mecânica de rotação em energia elétrica, ou converte-las em acionamentos mecânicos, usados para elevar a água a grandes alturas através de turbobombas, que serão aproveitadas em sistemas de irrigação e consumo humano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia potencial, energia elétrica, energia mecânica, turbinas, bombas de engrenagens, bombas turbo.

### DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF AN ALTERNATIVE PUMPING SYSTEM TO HARNESS THE POTENTIAL ENERGY OF WATER

**ABSTRACT:** The use of the potential energy of water is the energy transformation that is made by converting this energy into rotational mechanical energy and this in turn into different types of energy. Being able to adapt shafts to hydraulic wheels, turbines and convert the mechanical energy of rotation into electrical energy, or convert these into mechanical drives, used to raise water at high altitude through turbo pumps, which will be used in irrigation and consumption systems human.

**KEYWORDS:** Potential energy, electrical energy, mechanical energy, turbines, gear pumps, turbo pumps.

## 1 | INTRODUÇÃO

Historicamente, o desenvolvimento da sociedade humana tem se baseado no aproveitamento de fontes de energia primárias de tipo fóssil. Produto de seu uso indiscriminado gerou-se uma deterioração ambiental global que pode chegar a níveis insuportáveis se não se tomarem corretivos oportunos Posso (2002). A contínua e crescente deterioração do ecossistema mundial e o esgotamento a médio prazo das reservas de combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás são as principais consequências do actual sistema energético mundial. Com excepção da geotermia, todas as

energias renováveis derivam directa ou indirectamente da energia solar. Directamente no caso da luz e do calor produzidos pela radiação solar, e indirectamente no caso das energias eólica, hidráulica, marés, ondas e biomassa entre outras Santamarta (2010).

Embora as fontes de energia possam ser classificadas de diversas formas segundo o critério utilizado, a sua mais ampla classificação é em fontes renováveis e não renováveis. As primeiras são aquelas que se consomem a uma maior velocidade do que a natureza pode substituí-las; tal que a quantidade total disponível é cada vez menor e sua possibilidade de reposição remota, nesta categoria se localizam as fontes fósseis. As segundas são fontes que podem ou podem ser repostas através de processos cíclicos de periodicidade variável (de horas a anos) ou são inesgotáveis Posso (2002).

Segundo os dados da Agência Internacional de Energia, as energias renováveis ascendem a quase 29% do fornecimento total de energia primária nos países da América Latina, cifra relativamente alta em comparação com a quota de 5,7% das energias renováveis dos países da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Económico (OCDE) Canseco (2010).

A participação das energias renováveis na matriz energética do Equador considera os seguintes aspectos: a) Geração de eletricidade, através do aproveitamento de recursos naturais em projetos hidrelétricos, eólicos, biomassa (com geração) e solares (fotovoltaicos); b) obtenção de gás combustível (biogás), utiliza resíduos orgânicos produzidos pela agroindústria; c) utilização de biocombustíveis para o transporte, através da substituição parcial do consumo de gasolina extra com etanol (projecto-piloto na cidade de Guayaquil); d) aquecimento de água com energia solar, para substituir a utilização de eletricidade ou de gás de petróleo liquefeito, Diálogo Chino (2019).

No Equador a cobertura de eletrificação é de aproximadamente 91% a nível nacional, no setor rural é 85%. Nas zonas fronteiriças e orientais, o serviço elétrico é ainda muito precário, as metas do governo nacional do Equador são alcançar uma cobertura de eletrificação rural de 90% em toda as províncias do país, em um prazo de 10 anos, a partir de 2006, Maldonado (2014).

A Província de Loja, geograficamente está dividida em 16 cantões: Calvas, Catamayo, Célica, Chaguarpamba, Espíndola, Gonzanamá, Loja, Macará, Olmedo, Paltas, Pindal, Puyango, Quilanga, Saraguro, Sozoranga, Zapotillo, cada um destes cantões tem a sua cabeceira cantonal e está subdividido em paróquias e aldeias, algumas destas povoações carecem de electricidade, Maldonado (2014); conseqüentemente, carecem de sistemas de bombagem para as suas culturas já de ciclo curto como longo, é por isso que surge a necessidade de implementar sistemas alternativos de bombeamento.

O seguinte trabalho é realizado com base na geração de energia em pequena escala e construção de sistemas de irrigação alternativos em lugares onde não chegam as redes de distribuição elétrica, são as soluções económicas para a população destes lugares; pode-se derivar uma vertente de um rio ou quebrada para ser utilizada para fins agrícolas,

isto sem causar o mais mínimo dano ambiental.

Cada metro quadrado do território recebe diariamente, em média anual, 5 kWh de energia solar, equivalente à energia química acumulada em um litro de petróleo. “Com o aproveitamento tanto direto como indireto da energia solar se podem satisfazer todas nossas necessidades energéticas Hidalgo (2015). Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é o de desenvolver e construir um sistema de bombeamento alternativo para populações onde não chega o fornecimento elétrico.

Este caudal que se apresenta em forma de grandes saltos ou de pequenas correntes, é a fonte da energia hidráulica que se pode transformar em energia mecânica através de moto bombeamento e moinhos, ou em energia elétrica mediante barragens hidrelétricas.

Os rendimentos dos moinhos de água variam entre 30 % e 80 % e aumentam com a utilização de paletes. As usinas hidrelétricas modernas alcançam retornos de 75% a 90%, são muito eficientes em comparação com as usinas térmicas de obtenção de energia elétrica a partir dos combustíveis fósseis ou reações nucleares Hidalgo (2015).

A transformação energética segue um ciclo, pois a energia potencial da água se transforma em energia cinética e depois está em energia de pressão, tudo isto sobre as pás ou palhetas de uma turbina ou roda hidráulica, permitindo-nos obter uma energia mecânica de rotação, que é aproveitada na obtenção de energia elétrica ou para sistemas de turbo bombeamento.

## **2 | REFERÊNCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Metodologias ativas**

Esta parte descreverá a metodologia aplicada para a concepção, cálculo e construção de um sistema de bombagem alternativo, que neste caso será a construção da parte principal deste sistema que é a turbina de fluxo cruzado ou Michel Banky, dado que, tratando-se de uma máquina que responde a alturas de abastecimentos pequenos, os quais existem em grande quantidade no sector agrícola marginal; O tipo de bomba seja selecionado de acordo com a necessidade das práticas a serem realizadas por professores e estudantes da UNL. Sua construção se baseará em estudos já realizados, cujas experiências são muito úteis e de grande importância no desenvolvimento da mesma.

### **2.2 Energia hidráulica**

Energia hidráulica designa a energia solar que é transformada e acumulada como energia potencial de água quando se encontra num ponto mais alto do que outro, este método classifica como uma forma de aproveitamento indirecto da energia solar, Hidalgo (2015).

## 2.3 Aproveitamento da energia potencial da água em pequena escala

A energia hidráulica refere-se ao aproveitamento da energia potencial que tem a água (por diferença de altura) que se obtém procurando uma queda de água desde certa altura a um nível inferior, a que logo se transforma em energia mecânica (rotação de um eixo) com a utilização de uma roda hidráulica ou turbina. Esta energia pode ser usado diretamente para mover uma pequena serraria, um moinho ou máquinas de um benefício de café. Também é possível ligar a turbina a um gerador elétrico e, assim, transformar a energia mecânica em energia elétrica, com a vantagem de transferir com maior facilidade a energia para os pontos de consumo e aplicá-la a uma grande variedade de equipamentos e usos produtivos, Dalgleish (2007).

## 2.4 Transformando a energia potencial da água em sistemas de bombeamento através de bombas turbo

Bombas turbo.

Uma turbina transforma a energia potencial da água convertendo-a em energia mecânica, esta energia mecânica pode ser transformada em energia elétrica mediante um gerador, ou também pode ser aproveitada para mover diretamente uma bomba de água, ou um moinho de grãos, etc.

Ao acoplar a bomba à turbina se consegue uma TURBO BOMBA que serve para bombear água a grandes alturas, sem utilizar combustíveis fósseis. Eles são especialmente adaptados para bombear água das partes baixas dos vales para as áreas altas e podem gerar eletricidade simultaneamente ao bombeamento.

Componentes do sistema de turbo bombeamento

a) Turbina de fluxo cruzado ou tangencial (Michell Banky)

A turbina de fluxo transversal ou Michell-Banki é uma máquina utilizada principalmente para pequenos aproveitamentos hidrelétricos. Suas vantagens principais estão em seu design simples e fácil de construir, o que a torna atraente no equilíbrio econômico de um aproveitamento para pequena escala. No entanto, isso não impede que a turbina seja utilizada em grandes instalações. Embora a turbina de fluxo transversal seja conhecida como uma máquina de pequena escala, existem atualmente máquinas deste tipo até 6 MW, Michell-banky(2019).

As características qualitativas mais importantes da turbina Michell-Banki são:

- Tem uma ampla gama de aplicação, estando compreendida entre a turbina Pelton de duplo injetor e as Francis rápidas.
- Pode operar em amplas faixas de vazão e altura sem variar significativamente sua eficiência.
- Sua construção é simples, podendo ser fabricada em pequenas oficinas.
- Devido à sua simplicidade de construção e funcionamento, para baixas quedas,

é a turbina que apresenta os menores custos iniciais, bem como de operação e manutenção.

- É a turbina que melhor se adapta para ser usada em meios rurais, Paz, E; Carrosi, L; Maghalaés, P., e Romero (2007).

Características operacionais desta máquina são as seguintes:

A turbina Michell-Banki é uma máquina classificada como uma turbina de ação, entrada radial e fluxo transversal. Utilizada principalmente para pequenos aproveitamentos hidrelétricos, suas vantagens principais estão em seu simples desenho e sua fácil construção.

- a velocidade de rotação pode ser selecionada em uma ampla faixa.
- O diâmetro da turbina não depende necessariamente do caudal.
- Com pequenas turbinas é alcançado um nível aceitável de desempenho.
- O caudal e a potência podem ser regulados por meio de uma barra ajustável, Reina, C; Reina, S; Lábaque, M; Riha, César., Góngora (2017).

Princípio de funcionamento da turbina

A turbina consiste em dois elementos principais: um injetor e um rotor. A água é restituída mediante uma descarga à pressão atmosférica. O rotor é composto por dois discos paralelos aos quais estão ligadas as lâminas curvas em forma de setor circular. O injetor possui uma secção transversal retangular que vai unida ao tubo por uma transição retangular- circular. Este injetor é o que dirige a água para o rotor através de uma secção que toma uma determinada quantidade de lâminas deste, e que guia a água para que entre no rotor com um ângulo determinado obtendo o maior aproveitamento da energia. Fig. 1 Michell-banky(2019).

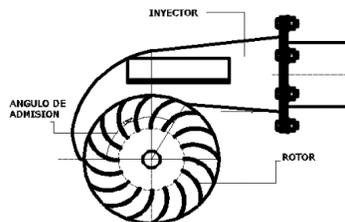


Figura 1. Injetor

A energia hidráulica é convertida em energia mecânica de rotação, que é transmitida através do eixo do rotor da turbina para o eixo da bomba volumétrica de engrenagens em acoplamento com polias e correias.

a) Bomba volumétrica ou de deslocamento positivo de engrenagens externas  
As bombas deste tipo encontram múltiplas aplicações Fig. 2. Ao rodar no sentido das setas no lado da admissão há sempre dois dentes que se separam, criando um vácuo, com o qual o líquido penetra no estator, e é deslocado pelos espaços entre os dentes e o estator para a movimentação, onde pelo contrário sempre há dois novos dentes que engrenam e expulsam líquido, Mataix (1986).

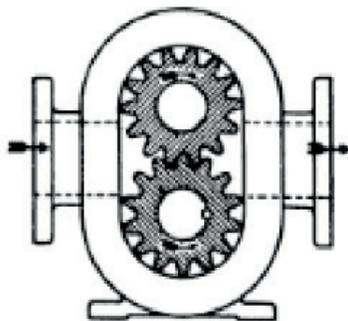


Figura 2. Bomba de engranajes externos

#### Funcionamento do sistema de bombagem

Fernández Diez (2015) afirma: O funcionamento consiste, na passagem periódica de certas porções de líquido, que começa na cavidade de aspiração, para depois ir à cavidade de descarga da bomba, com um aumento de pressão; a cavidade de aspiração tem que estar, sempre, hermeticamente isolada da de descarga ou de movimentação. Em geral, todas as bombas volumétricas são auto-aspirantes, ou auto-cebantes, por isso, se eles começam a funcionar com ar, sem líquido, podem chegar a criar uma rarificação tão grande capaz de succionar o líquido pelo tubo de aspiração.

#### Altura de Bombeamento

Aplicando a expressão matemática do teorema de Bernoulli que diz: “Se não houver perda de carga entre duas secções da circulação de um líquido em regime permanente, a soma das cargas de altura ou posição, de velocidade e de pressão é constante em qualquer secção do líquido”. Além disso, a equação de Bernoulli é uma relação aproximada entre a pressão, a velocidade e a elevação, e é válida em regiões de fluxo estacionário e incompreensível onde as forças líquidas de atrito são desprezíveis, Cengel, Y e Cimbala (2014).

A equação de Bernoulli leva em conta as mudanças na carga de elevação, carga de pressão e carga de velocidade entre dois pontos em um sistema de fluxo de fluido. Supõe-se que não há perdas ou adições de energia entre os dois pontos, pelo que a carga total permanece constante sob a seguinte expressão: Mott (2002).

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

b) Acoplamento dos sistemas de bombagem

O sistema consiste no acoplamento de uma turbina tipo fluxo cruzado Michell-Banki a uma bomba volumétrica de engrenagens, como mostrado na fig. 3. A variada aplicação destes sistemas pode incluir a geração de energia elétrica, mecânica diretamente (moinhos, serrarias, etc.)

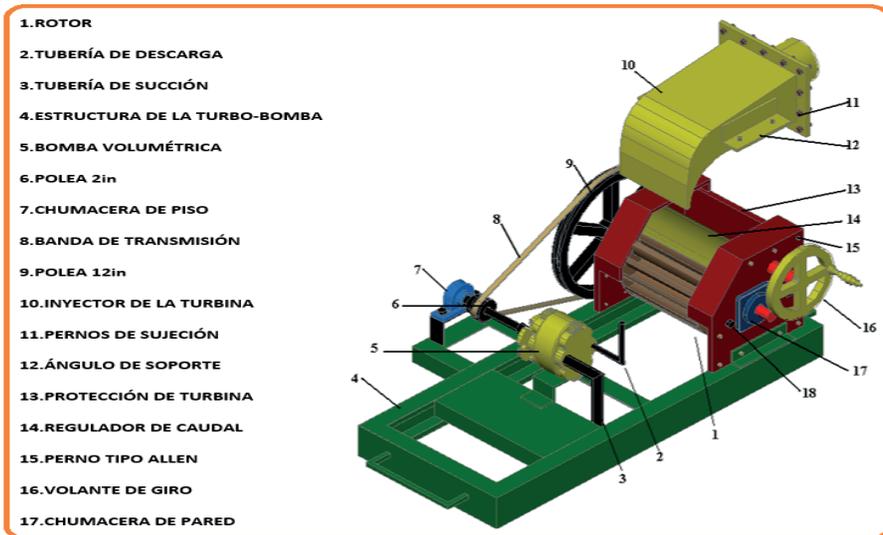


Fig.3 Esquema de una turbo – bomba (Autor)

A partir deste ponto a bomba volumétrica começa a sugar a água e eleva-a. Esta mudança de energia mecânica no eixo da bomba permite fornecer ao fluido energia suficiente para poder chegar a grandes alturas.

## 2.5 Concepção e construção do protótipo de turbina de fluxo cruzado Michell Banky

Para o projeto da turbina de fluxo cruzado foi utilizada a metodologia de projeto hidráulico e mecânico de uma turbina Michell - Banki, a mesma que ficou padronizada com os critérios do 8º CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA realizado em Cusco - Peru em 25 de outubro de 2007, sob cujos parâmetros ou faixas de operação servirão para o dimensionamento da turbina.

Após a aplicação das formulações de desenho tanto hidráulico como mecânico foi realizado o escolhimento dos materiais que comporão estes desenhos que depois de mecanizá-los se obterá a turbobomba.

Na construção do rodete foi utilizado para a carcaça e os discos laterais, chapa preta A36 de resistência última de 254 Mpa, o eixo é trabalhado em aço ligado SAE 1040 de 54Mpa , na construção dos alabes se utilizou tubulação de gás sem costura Cedula 40 de diâmetro 2”1/2 de espessura de parede 0.203” com um limite de fluência do material 235 Mpa, da qual se pode obter 3 partes de alabes. Figura 4



Fig. 4 rodete con sus partes ensambladas (Autor)

No que diz respeito à união das partes desmontáveis, utilizou-se a tornozeleira allen, a mesma que é de muita utilidade para sua montagem final, na junção de alabes com discos e eixo utilizou-se solda elétrica de raiz 7018. Figura 5



Fig.5 partes desmontables (Autor)

O injetor, peça fundamental de entrada do fluxo de água para o rodete, em sua construção foi utilizado material A 36 onde o limite de fluência 235 Mpa, a mesma que resiste as tensões que se produzirão sob o efeito da quantidade de água que passará por seu interior. Figura 6.



Fig.6 rodete (Autor)

A obtenção dos materiais não é difícil, uma vez que estes existem no mercado local ou podem também ser encontrados em centros de chatarrização; além disso, pode mencionar-se que a construção das diferentes partes pôde ser realizada no laboratório da oficina mecânica da Universidade Nacional de Loja, os mesmos que são mencionados no trabalho de tese Desenho e construção de um protótipo didático de TURBO BOMBA para aproveitamento hidráulico, Pesántez, P e Bustán (2010).

### 3 I RESULTADOS

Depois de realizadas as práticas experimentais no local de ladrilho do cantão Catamayo província de Loja, foram obtidos os seguintes resultados:

Parâmetros

Para conseguir determinar a potência que a água brinda à turbina é necessário determinar a altura manométrica, isto é:

$H = 4\text{m.}$  do canal ao rotor da turbina.

$Q = 0,020 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Desempenho (  $\eta$  ) = 70%. Da turbina.

$n = 392,7 \text{ rpm.}$

$D_e =$  diâmetro externo do rotor 200 mm.

#### 3.1 Potência da turbina

A energia que um fluido transmite a um dispositivo mecânico, como a um motor de fluido ou a uma turbina, é denotada na equação geral da energia com o termo. Esta é uma medida da energia transmitida por cada unidade de peso do fluido que passa através do dispositivo, Mott (2002).

Calculamos a potência que o fluido dá à turbina:

$$Pr = Q.H.\gamma$$

$$Pr = 9.81 \frac{KN}{m^3} \cdot 0,020 \frac{m^3}{s} \cdot 4m = 0.78 Kw \approx 1.05Hp$$

### 3.2 A potência de comunicação da turbina ao eixo da bomba

A potência que o rotor transmite ao eixo da turbina ou de saída ( $P_o$ ) com um rendimento de 70%, podemos obtê-la da seguinte equação:

$$P_o = \eta.P_r$$

$$P_o = 0,7 \cdot 0,78Kw = 0,549 Kw \approx 0,73 Hp$$

### 3.3 Caudal médio aspirado fornecido pela bomba

Parâmetros de bombeamento.

- $Z_1 = 0.5m$  nível desde o piso até à superfície da água a bombear
- $Z_2 = 30m$  nível para o qual a água subiu ao ser bombeada pela bomba turbo
- $Q = 0,020 m^3/s$ . Caudal útil da bomba de engrenagens.
- Para determinar a potência que a turbina comunica ao eixo, é necessário determinar a altura manométrica, ou seja:
- Tubo de sucção diâmetro = 5/8" ou 16 mm.
- Tubulação de movimentação diâmetro = 1/2" ou 12.7 mm.
- Área do tubo de impulso = 0.0001266 m<sup>2</sup>
- Área do tubo de sucção = 0,0002010 m<sup>2</sup>

As pressões tanto de sucção como de descarga, são a Pressão atmosférica.

Velocidades de sucção até ao recipiente de descarga igual a zero

Alturas de posição ou geodésicas:  $Z_2 = 30m$  e  $Z_1 = 0,5 m$  respectivamente.

Para determinar o caudal total, foram realizadas práticas experimentais com bombas centrífugas e de deslocamento positivo ou de engrenagens, optamos pela bomba de engrenagens já que nos oferece melhores resultados. Como afirma Fernandez Diez (2015) em seus escritos sobre bombas volumétricas que o fluxo aspirado pela bomba, (quando a impermeabilidade da mesma é absoluta para um funcionamento normal e sem cavitação, pelo que se pode assegurar o enchimento das câmaras de trabalho com o líquido a transvasar, o que implica a não existência de fugas nem vaporizações) é:

$$qt = \frac{w \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot V_d \cdot z \cdot n}{60} \left( m^3/s \right) \approx qt = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30} * 2,16 * b * h \left( m^3/s \right)$$

- $qt =$  caudal

- R = rádio primitivo da engrenagem
- n = número de rotações da árvore da bomba
- h = módulo do dente
- b = comprimento axial do dente

$$qt = \frac{\pi * R * n}{30} * 2,16 * b * h \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$qt = \frac{\pi * 0,022 * 2356,2}{30} * 2,16 * 0,044 * 0,003175 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$qt = 0,001637 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Para determinar a altura manométrica (Ha) utilizamos a seguinte equação:

$$Ha = Z2 - Z1$$

$$Ha = 30\text{m} - 0,5\text{m} = 29,5\text{m}$$

### 3.4 A potência hidráulica que a bomba comunica ao líquido é:

A potência é definida como a rapidez a que se realiza um trabalho. Na mecânica dos fluidos, esta frase é alterada e considera-se que a potência é a rapidez com que a energia é transferida Mott (2002). Como indicado foi escolhido a partir das formulações de bombeamento de Robert Mott em Mecânica de fluidos para os respectivos cálculos.

A potência útil da bomba é: A potência calculada pela seguinte expressão, é a potência (Pa) que ganharia o fluido em sua passagem pelo equipamento de bombeamento.

$$Pa = \gamma \cdot qt \cdot Ha$$

$$Pa = 9,81 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \cdot 0,001637 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 29,5\text{m} = 0,47\text{Kw} \approx 0,63\text{Hp}$$

### 3.5 Desempenho da bomba é:

$$\eta = \frac{Pa}{Po}$$

$$\eta = \frac{0,47}{0,54} = 0,85 \approx 85\%$$

A potência finalmente consumida (Po) por todo este equipamento de bombagem é superior à potência útil (Pa), dado que é necessário ter em conta as perdas e o rendimento de cada um dos componentes envolvidos, não foram consideradas as mesmas para este cálculo, uma vez que os dados recolhidos são experimentais

### 3.6 O desempenho da bomba turbo em geral ( $\eta_T$ ) é:

$$\eta_T = \frac{Pa}{Pr}$$

$$\eta_T = \frac{0.47}{0.78} = 0,60 \approx 60\%$$

Este desempenho é aceitável, uma vez que nas práticas foi utilizada uma altura geodésica de 4 metros, o que nos deixou muito satisfeitos, pois se tivéssemos realizado com maior altura obteríamos maior velocidade da turbina e por conseguinte maiores revoluções no eixo da bomba e assim poder-se-ia ter elevado a água a mais altura.

Este desempenho é aceitável, uma vez que nas práticas foi utilizada uma altura geodésica de 4 metros, o que nos deixou muito satisfeitos, pois se tivéssemos realizado com maior altura obteríamos maior velocidade da turbina e por conseguinte maiores revoluções no eixo da bomba e assim poder-se-ia ter elevado a água a mais altura.

### 3.7 Análise dos gráficos do sistema de bombeamento

O seguinte gráfico corresponde a uma curva que demonstra como se comporta a bomba considerando dois parâmetros de funcionamento; referimo-nos ao caudal bombeado em gal/min vs. a altura manométrica. Figura 7.

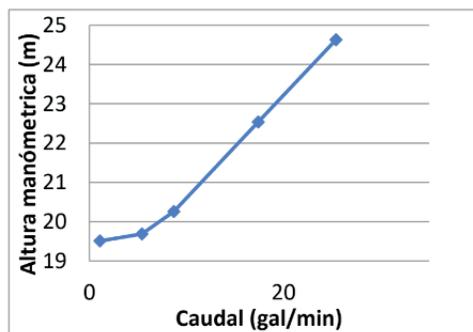


Fig.7 Curva del sistema Q vs. Hm

Neste Grafico observamos o comportamento do fluxo em função das rotações do eixo da bomba. Figura 8.

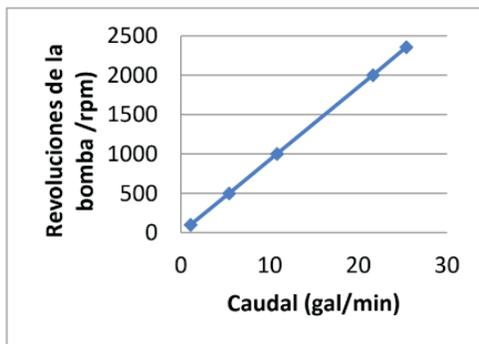


Fig. 8 Curva de la bomba Q vs rpm

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por conseguinte, os cálculos matemáticos efectuados permitem concluir que são aplicáveis à concepção e construção da turbina de fluxo cruzado, além disso, pode indicar-se que o caudal de bombagem varia directamente com as rotações que o eixo da bomba dá e estas por sua vez com o giro que a turbina sob o parâmetro de alimentação e altura ; Chegando à conclusão que quanto mais revoluções se conseguir imprimir no eixo da bomba mais caudal poderemos bombear, indubitavelmente mudando os parâmetros de dimensão das tubulações de sucção e impulsão.

Quanto à potência do sistema, está dentro do que tem que ver com outros tipos de equipamentos destinados a estas características de trabalho, além do desempenho da bomba é muito aceitável, o seu valor flutua em 85%; enquanto se conseguiu obter um 60% de rendimento total do sistema.

## REFERÊNCIAS

Posso, F. “Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas Universidad de los Andes Cómo citar el artículo Número complet,” *Geoenseñanza*, vol. 7, pp. 54–73, 2002.

Santamarta, J. “Las energías renovables son el futuro,” 2010.

Canseco, P. “LATINA,” 2010

Diálogo Chino China construye la planta solar más grande de América Latina, Recuperado de: <https://dialogochino.net/es/clima-y-energia-es/23529-china-construye-la-planta-solar-mas-grande-de-america-latina/> 2019

Maldonado, J. “Desarrollo de energías renovables a pequeña escala en los sectores rurales de la provincia de Loja,” vol. 27, no. Octubre, pp. 59–69, 2014.

Bravo, D. "Energía y desarrollo sostenible en Cuba," *Cent. Azúcar*, vol. 42, no. 4, pp. 14–25, 2015.

Dagleish, T et al., "Artículos Académicos," vol. 136, no. 1. 2007.

Michell-banki, T. "Fichatecnica2-Turbina+michell+bankL," *REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT*. No. 511. 2019

Paz, E; Carrocci, P; Magalhães, e Romero, C. "Metodología de Diseño Hidráulico y Mecánico de una Turbina Michell-Banki," 8º Congr. Iberoam. Ing. Mec., 2007.

Reyna, C; Reyna, S; Lábaque, M; Riha, César; Góngora, "Redalyc.DESAFIOS AMBIENTAL ES PARA USO DE LA HIDROGENERACIÓN," 2017.

Mataix, C. "Ingenieria - Claudio Mataix - Mecanica De Fluidos Y Maquinas Hidraulicas.Pdf." pp.423–435, 1986.

Fernández, P. "Bombas centrifugas," *Bombas centrifugas y Vol.*, pp. 13-69, 103, 2015.

Çengel, Ya e Cimbala, JM. McGraw-Hill, 2014. 2544\*, 2014. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, Ed. 2. YA Cengel, JM Cimbala. Tata McGraw-Hill.

Mott, R. *Mecanica de Fluidos*, vol. 3 ed. 2002.

Pesántez, P e Bustán, D. "Diseño y construcción de un prototipo didáctico de TURBO BOMBA para el aprovechamiento hidráulico [Design and construction of a teaching prototype of TURBO PUMP for hydraulic use]," p. 140, 2010.

## AVALIAÇÃO TÉRMICA DE VEÍCULOS COM E SEM PELÍCULA TÉRMICA

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 08/12/2020

### Weverson Carlos Fortes

Universidade Federal de Mato Grosso  
Campus Várzea Grande  
Cuiabá – Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/4923098649607056>

### Maribel Valverde Ramirez

Universidade Federal de Mato Grosso  
Campus Várzea Grande  
Cuiabá – Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/9371597807489520>

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo sobre o acúmulo térmico na cabine de um carro parado sob exposição direta à luz solar. Dado que é um problema atual principalmente em cidades com clima tropical quente. A falta de controle pode ser crítica para a saúde dos passageiros. Neste estudo foram avaliados parâmetros que influenciam no conforto térmico na cabine do carro: a temperatura e a umidade. Para isso foi construído um dispositivo de leitura composto por sensores e microcontroladores. Os experimentos foram realizados em dois carros. O primeiro carro possui janelas com películas escuras (conhecido também como película térmica) e o segundo carro possui janelas transparentes. Os carros utilizados no experimento tinham o mesmo desenho. Os resultados mostraram que a temperatura interna no carro com película térmica teve um menor aquecimento comparado

com o carro de janelas transparentes. A umidade registrada foi menor quando a temperatura registrada foi maior essa tendência foi verificada com artigos disponíveis na literatura. O uso da película térmica é uma alternativa para gerar reflexão da energia solar que incide na superfície do carro, porém, é necessário avaliar películas de diferentes qualidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Temperatura do carro, umidade do carro, aquecimento, película térmica.

### THERMAL EVALUATION OF VEHICLES WITH AND WITHOUT THERMAL FILM

**ABSTRACT:** This work presents a study on the thermal accumulation in the cabin of a car stopped under direct exposure to sunlight. Given that it is a current problem mainly in cities with a hot tropical climate. Lack of control can be critical to the health of passengers. In this study, parameters that influence thermal comfort in the car cabin were evaluated: temperature and humidity. For this purpose, a reading device composed of sensors and microcontrollers was built. The experiments were carried out in two cars. The first car has windows with dark films (also known as thermal film) and the second car has transparent windows. The cars used in the experiment had the same design. The results showed that the internal temperature in the car with thermal film had less heating compared to the car with transparent windows. The recorded humidity was lower when the recorded temperature was higher, this trend was verified with articles available in the literature. The use of thermal film is an alternative to generate reflection of the solar energy that affects the surface of the

car; however, it is necessary to evaluate films of different qualities.

**KEYWORDS:** Car temperature, car humidity, heating, thermal film.

## 1 | INTRODUÇÃO

O acúmulo térmico na cabine de um carro parado, sob exposição direta à luz solar pode ser extremamente crítico para a saúde física e a segurança dos passageiros (McLaren et al., 2005 e Grundstein et al., 2009), gerando risco de insolação, visão embaçada (efeito fogging), sonolência e colapso físico (em caso de exposição excessiva ao calor). Além do estresse térmico as altas temperaturas podem acelerar a degradação das superfícies do veículo (Uddin e Ya'akub 2020, Chua et al., 2019). O calor absorvido pela superfície interna do carro gera produtos tóxicos para a respiração como éteres bifenílicos, polibromatos e ésteres de ácido ftálico (Chua et al., 2019). Outro ponto importante em destaque da importância do estudo são as crianças e animais de estimação presos dentro da cabine de um carro parado sob exposição direta à luz solar, segundo Chua et al., 2019 a insolação pode ocorrer em um tempo inferior aos 60 minutos, portanto há uma necessidade de examinar o acúmulo de calor na cabine do carro parado ao longo do tempo para determinar soluções adequadas e econômicas.

O aquecimento da cabine é devido principalmente à radiação solar quando existe exposição prolongada, a radiação solar entra na cabine através das janelas de vidro. Na análise podem ser considerados fenômenos físicos como o efeito estufa, espalhamento e reflexão da luz e calor pelos materiais utilizados principalmente nas janelas, esses materiais absorvem parte da radiação solar que é convertida em calor. Outros fatores que influenciam no aumento da temperatura interna na cabine de um carro parado são: a cor, o uso de janelas com películas térmicas, e o volume interno da cabine.

Segundo DeMuro (2015) a cor do carro pode ter um impacto no conforto térmico, carros pretos esquentando mais rápido e esfriando mais devagar que os brancos. Segundo Manning e Ewing (2009), o uso de janelas com películas térmicas pode diminuir a transferência de calor para região interna da cabine, os autores verificaram também que as janelas sem a película térmica apresentam maiores flutuações de temperatura comparado com as janelas utilizando a película térmica. Manning e Ewing (2009) indicaram que filmes de diferentes qualidades podem gerar diferentes resultados, devido a que a qualidade do filme influencia diretamente nos resultados. Uddin e Ya'akub (2020), observaram que a temperatura interna do carro depende do desenho interno. Carros com menor volume interno apresentam maiores temperaturas se comparados com carros com maior volume interno, os experimentos foram realizados sob exposição total ao sol e com as mesmas condições ambientais.

Segundo a revista eletrônica McLay Industries, a película automotiva é um material de revestimento semelhante a um plástico adesivo que é colocado nos vidros. Está película

tem a capacidade de reduzir o passo da energia térmica vinda do sol dado que atua como uma superfície isolante, onde o coeficiente de condutividade e a emissividade da superfície são reduzidos.

O conforto térmico na cabina interna do carro depende de parâmetros mensuráveis e de fatores pessoais. Nos parâmetros mensuráveis estão a temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar, umidade relativa. Nos fatores pessoais temos o nível de atividade e o tipo de roupa. Segundo Simion et al., 2016 o parâmetro crucial para o conforto térmico na cabina do carro é a temperatura do ar. A temperatura do ar está fortemente relacionada com a umidade relativa. Com o aumento da temperatura a umidade diminui. A umidade relativa entre 30% ~ 70% não influencia o conforto térmico. Quando a umidade relativa está acima de 70%, isso impedirá a evaporação do suor e, em seguida, causar sensação de clima abafado e deixar os ocupantes sentirem desconforto. Quando a umidade relativa é menor de 30%, causará sensação de secura e prejudicará as mucosas (Simion et al., 2016).

O presente estudo teve como objetivo a análise da temperatura e umidade na cabina de um carro parado. Foram analisados dois carros: uma com janelas transparentes e outro com janelas escuras (com filme térmico protetor). O estudo foi realizado na Universidade Federal de Mato Grosso localizada na cidade de Cuiabá. A cidade está localizada no Centro-Oeste brasileiro, com clima predominantemente tropical quente. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), a temperatura recorde foi registrada no dia 14/09/2020 onde a temperatura foi 42,7 °C e umidade relativa do ar de 7%. Para o desenvolvimento da pesquisa foi construído um dispositivo de leitura da temperatura e umidade os quais foram integrados a um microcontrolador que gerencia e manipula os dados coletados. Os dados experimentais foram coletados no mês de julho e agosto de 2019.

## 2 | METODOLOGIA

A pesquisa foi dividida em duas etapas, primeiro a construção do dispositivo de leitura da temperatura e umidade, logo foram realizadas as leituras das variáveis de interesse de forma experimental.

Na construção do dispositivo de leitura foram utilizados sensores tipo DHT22 para a medição da umidade e temperatura. Todos os dados coletados pelos sensores, foram armazenados em um micro SD, onde o usuário teve acesso às informações. Na coleta dos dados experimentais foi utilizado também uma câmara térmica, a câmara térmica permite detecção automática de pontos frios e quentes na cabine do carro, o uso desta câmara térmica serviu para comparação do dispositivo desenvolvido e precisão quanto as informações coletadas. O termômetro digital foi utilizado para calibrar o dispositivo construído.



Figura 1 – (a) Dispositivo construído para medição das variáveis, (b) câmera térmica e termômetro digital laser utilizados no experimento

Para a realizar a parte experimental, o processo de coleta das variáveis temperatura e umidade na cabine do carro parado foram utilizados dois carros como mostra a Figura 2. O carro 1 possui janelas com película escura, filme térmico da marca 3M e o carro 2 possui janelas transparentes. Os carros utilizados nos experimentos tinham o mesmo desenho. Os experimentos foram realizados num local aberto na Universidade Federal de Mato Grosso. O dispositivo construído para a leitura da temperatura e da umidade foi colocado na cabine do carro na região central.



Figura 2: Veículos utilizados para os testes, sendo o carro 1 com película e carro 2 sem película.

## 2.1 Hardware do dispositivo

O dispositivo de leitura possui um sensor de umidade e temperatura, o dispositivo conta também com um RTC (Real Time Clock), ou seja, um Relógio de Tempo Real que possui como características: armazenamento e fornecimento de informações completas de data, hora, mês e ano. Outro componente utilizado foi o módulo do cartão micro SD, para gravador de dados gerados pelo sensor. Todos estes elementos estão em um único circuito, conforme apresentado na Figura 1. O dispositivo possui um display LCD que serve para visualização dos dados coletados como apresentado.

## 2.2 Software do dispositivo

Para a realização do controle do dispositivo foi utilizado um Arduino Nano, onde ele possui um microcontrolador ATmega328P, que gerencia e manipula a interface do usuário. Neste microcontrolador é possível executar os programas necessários para o controle de outros equipamentos. O Arduino disponibiliza de uma IDE, onde é possível implementar programas que serão executados nestes microcontroladores. Conforme podemos observar na Figura 3 o fluxograma utilizado na construção do dispositivo de leitura. Todos os componentes foram declarados como variáveis e cada um desempenhou sua função específica, o sensor realiza a leitura da umidade e temperatura, as informações foram coletadas e escritas no cartão SD e armazenadas. Para ter um melhor controle no monitoramento dos dados coletados foi utilizado o RTC para registrar as informações como data, hora, mês e ano, contribuindo na organização dessas.

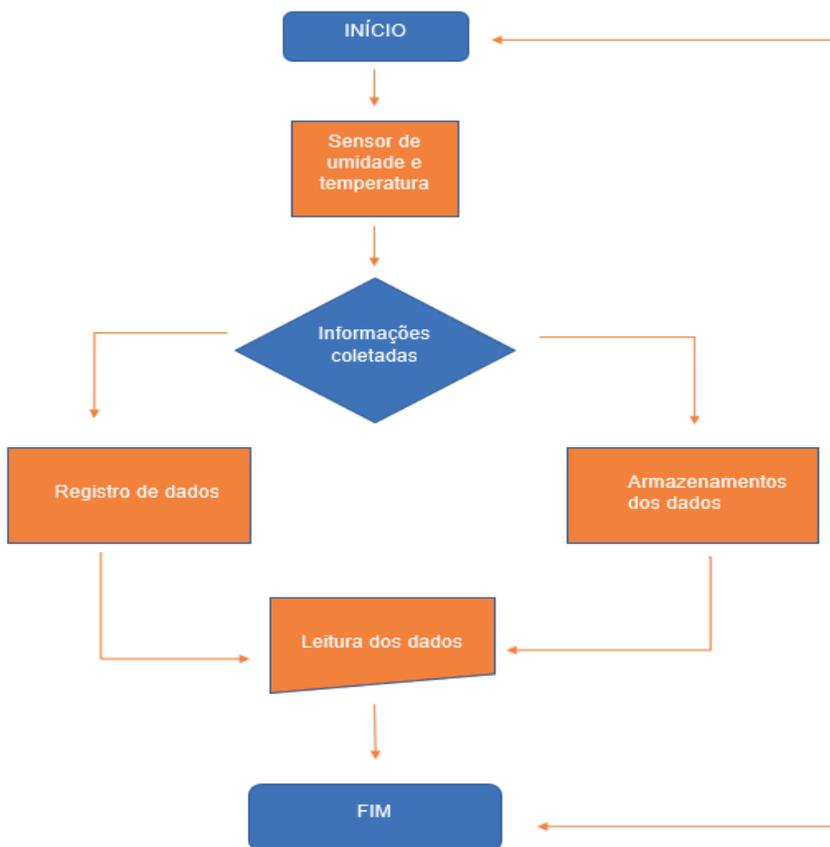


Figura 3 – Funcionamento do dispositivo de medição de umidade e temperatura.

Fonte: O Autor

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O dispositivo construído foi colocado na cabine interna do carro, na região central. Os resultados apresentados a seguir são os valores médios obtidos nos dias 15 e 30 de julho e 15 e 30 de agosto de 2019 no período das 8:00 até às 14:00 horas.

Na Figura 4 são apresentados os resultados da temperatura, é possível observar que a temperatura externa é menor (linha preta), a temperatura na cabine dos dois carros apresenta a mesma tendência, o incremento ao longo do tempo, das 8:00 até às 11:00 horas, logo apresentam o comportamento constante, o carro com a película escura apresenta menor temperatura comparado com o carro sem a película escura. O uso da película aumentou a reflexão solar tendo como consequência menor temperatura interna na cabine.

O mesmo comportamento foi observado por Manning e Ewing (2009) para o caso de cabines com película escura. Para janelas transparentes Abd-fadeel e Hassane (2013) e Manning e Ewing (2009) observaram a mesma tendência que foi observada neste estudo.

Na Figura 4 observa-se também que na cabine com janelas transparentes é possível observar grandes oscilação de temperatura entre as 9:20 e 9:40 horas essa mesma observação foi indicada por Manning e Ewing (2009). Os autores indicaram que a película escura atua como amortecedor diminuindo as oscilações de temperatura.

Neste estudo não foi avaliado o processo de perda de temperatura ao longo do tempo, ou seja, no período da tarde e à noite, observa-se a necessidade de continuar a coleta de dados experimentais por um período maior. Segundo Manning e Ewing 2009 no processo de perda de temperatura, no final do dia, a perda de temperatura é retardada para as janelas com películas escuras.

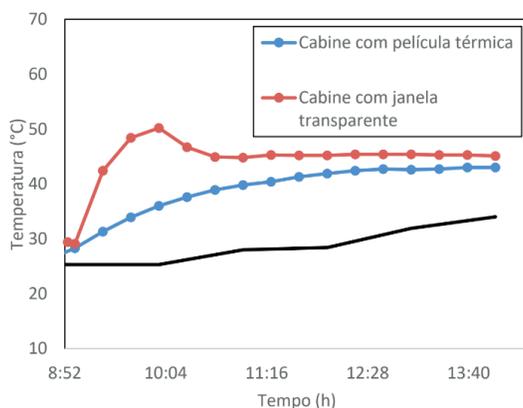


Figura 4: dados da temperatura.

Fonte: o Autor

Na Figuras 5 são apresentados os resultados da umidade, é possível observar que em todos os casos a umidade diminui com a aumento da temperatura, na cabine com janelas transparentes a queda da umidade é maior. Um comportamento similar foi obtido por Alahmer et al., 2011. Segundo Alahmer et al., 2011 o controle da umidade relativa e da temperatura interna da cabine permitem melhorar o conforto térmico, gerando economia dado que a quantidade de calor a ser removido é menor.

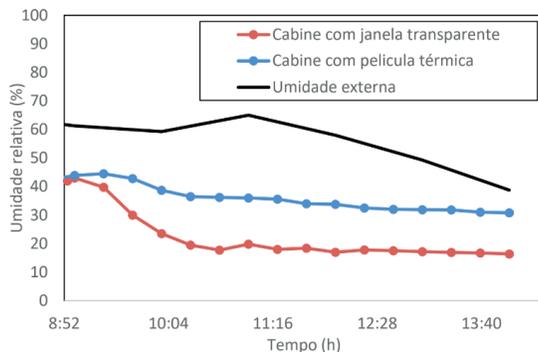


Figura 5: dados da umidade.

Fonte: o Autor

Na Figura 6 observa-se as imagens obtidas com a câmera térmica, no início e no final do experimento. É possível observar que às 8 horas, os carros, estão em uma temperatura inferior, a cor predominante é azul escuro, por outro lado às 14 horas, observa-se que a cor predominante é amarela clara. Às 8:00 horas nota-se que no carro 1 o vidro traseiro, está muito mais quente do que no carro 2, carro esse que não possui película. Às 14 horas observa-se que o carro 1 apresenta maior temperatura que o carro 2.

Segundo ÇENGEL (2015), isso ocorre em virtude de que o vidro que contém a película possui maior reflexão dos raios solares, o carro sem película, com janelas transparentes absorve e transfere a energia para a parte interna da cabine por esse motivo a superfície esquenta menos comparado com a janela com película térmica.



Foto da câmera térmica às 8 horas.

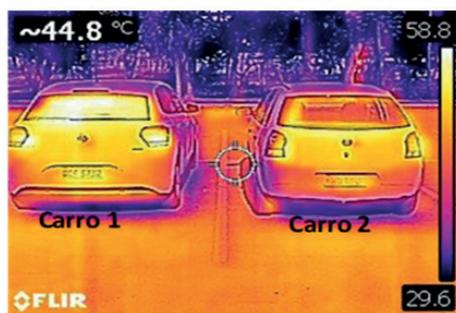


Foto da câmera térmica às 14 horas.

Figura 6. Fotos na câmera térmica no início e no final do experimento.

Fonte: o Autor

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção do dispositivo do sistema embarcado foi essencial para facilitar o trabalho experimental, os custos na fabricação foram baixo comparados com os dispositivos prontos existentes no mercado. O estudo do acúmulo térmico na cabine de um carro parado, sob exposição direta à luz solar é um tema importante dado que faz parte do cotidiano em cidades como Cuiabá onde predominam as altas temperaturas.

Foi verificado que o acúmulo térmico depende da temperatura e da umidade, quando a temperatura aumenta a umidade diminui, isso foi verificado em todos os experimentos. O uso de películas escuras nas janelas dos carros é uma alternativa para diminuir o aquecimento da cabine do carro, a película favorece o conforto térmico devido a que gera um grau de reflexão dos raios solares que incidem na superfície externa do carro. Porém é preciso realizar experimentos com películas de diferentes qualidades.

## REFERÊNCIAS

ABD-FADEEL, W. A.; HASSANEIN, S.A. **Temperature variations in a parked car exposed to direct sun during hot and dry climates**, International Journal of Automobile Engineering, v. 3, P. 75-80, 2013

ALAHMER, A.; OMAR, M.; MAYYAS, A. DONGRI, S. **Effect of relative humidity and temperature control on in-cabin thermal comfort state; thermodynamic and psychometric analyses**, Applied Thermal Engineering, v. 31, p. 14-15, 2011.

CHUA, S. N. D.; CHAN, B. K.; LIN E. S. F.; **Experimental and simulation study of thermal accumulation in an enclosed vehicle**, Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering 2019.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2015.

DEMURO. D. **Car Color Test: are black cars really hotter in the sun?** Revista Autotrader, August 2015.

GRUNDSTEIN, A.; MEENTEMEYER, V.; DOWD, J. **Maximum vehicle cabin temperatures under different meteorological conditions**. International Journal of Biometeorology, v. 53, p. 255-261. 2009.

MANNING R. e EWING J. **Temperature in cars survey**, RACQ 2009.

MCLAY INDUSTRIES. **Revista: Sunergy**, 2015.

MCLAREN, C.; NULL, J.; QUINN, J. **Heat stress from enclosed vehicles: moderate ambient temperatures cause significant temperature rise in enclosed vehicles**, J. American academy of pediatrics, v. 116, p. 109-112, 2005.

SIMION M, SOCACIU L AND UNGURESAN P. **Factors which influence the thermal comfort inside of vehicles**. Energy Proced, v. 85, p. 472-480, 2016.

UDDIN M. R.; YA'AKUB, F. **Parked car interior temperature investigation in Brunei Darussalam**, International Journal of Engineering Materials and Manufacture, v. 5, p. 12-18, 2020.

## COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA AND PREDICTION MODELS OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY FOR A RICE HUSK AND SAND MIXTURE IN FLUIDIZED BED

*Data de aceite: 01/03/2021*

*Data de submissão: 05/01/2021*

### **Fernando Manente Perrella Balestieri**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Unesp, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG)  
Guaratinguetá-SP  
<http://lattes.cnpq.br/5981747414975081>

### **Carlos Manuel Romero Luna**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Unesp, Faculdade de Engenharia de Itapeva  
Itapeva-SP  
<http://lattes.cnpq.br/3587541572857005>

### **Ivonete Ávila**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Unesp, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG)  
Guaratinguetá-SP  
<http://lattes.cnpq.br/3677902255431448>

**ABSTRACT:** Large quantities of rice husk are produced annually as a result from agricultural waste, which, if not treated or discarded correctly, may increase the greenhouse effect and more negatively impact the environment than a controlled process of combustion or gasification. One of the ways of avoiding this problem is using the rice husk as a source of energy. Although that there are many systems that can do that, the fluidized bed presents a good fuel flexibility and high conversion efficiency. In order to design the

fluidized bed, the minimum fluidization velocity is one of the main parameters to be accounted. This parameter, however, is dependent on other factors such as granulometric distribution and density of the particulates composing the bed. Therefore, one way which may help reduce the resources and the amount of time spent in the development cycle is creating prediction models for this variable, making it possible to design the system without having to build several prototypes. Even though that have been studies involving prediction models of minimum fluidization velocity for biomass, not many have focused on the mixture between rice and sand. Consequently, the aim of this work is to test some of these models available in the literature and compare them to experimental results. Considering the two tested prediction models, both of them underestimate the minimum fluidization velocity when compared to the experimental data.

**KEYWORDS:** Fluidized bed, Binary mixture, Rice husk, Minimum fluidization velocity.

### COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E MODELOS DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO PARA MISTURA DE CASCA DE ARROZ E AREIA EM LEITO FLUIDIZADO

**RESUMO:** Grandes quantidades de casca de arroz são produzidas anualmente a partir de resíduos agrícolas e que se não tratados ou descartados corretamente, podem aumentar o efeito estufa e impactar mais negativamente o meio ambiente do que um processo controlado de combustão ou gaseificação. Uma das formas

de evitar esse problema é usar a casca de arroz como fonte de energia. Embora existam muitos sistemas que podem fazer isso, o leito fluidizado é um sistema flexível e de alta eficiência. Para projetar o leito fluidizado, a velocidade mínima de fluidização é um dos principais parâmetros a serem contabilizados. Este parâmetro, no entanto, é dependente de outros fatores como distribuição granulométrica e densidade dos particulados que compõem o leito. Portanto, uma forma que pode ajudar a reduzir os recursos e o tempo gasto no ciclo de desenvolvimento é a criação de modelos de previsão para esta variável, possibilitando projetar o sistema sem a necessidade de construir vários protótipos. Embora estudos tenham sido feitos envolvendo modelos de previsão de velocidade mínima de fluidização para biomassa, poucos se concentraram na mistura entre arroz e areia. Conseqüentemente, o objetivo deste trabalho é testar alguns desses modelos disponíveis na literatura e compará-los com resultados experimentais. Para os dois modelos de predição testados, ambos subestimam o valor da velocidade mínima de fluidização quando comparados com os dados experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Leito fluidizado, Mistura binária, Casca de arroz, Velocidade mínima de fluidização.

## 1 | INTRODUCTION

The fluidized bed is a system that has many types of applications in the industry, ranging from obtention of polymers and other types of chemical products to the processes of drying and heating. Considering all the possibilities for fluidized beds, one application that has a lot of potential is in thermochemical processes involving biomass. The fluidized bed can be used not only for pyrolysis and gasification, but also for combustion, having advantages such as fuel flexibility and high efficiency. However, in many cases, an inert such as sand is mixed with the biomass to improve the quality of fluidization and homogeneity of the thermal profile along the bed.

Biomass can be considered a good source of energy because it is renewable and it can be obtained from crop field residues. If these residues are discarded without any treatment, it will increase the greenhouse effect and it will more negatively impact the environment than if it were used in a controlled process of combustion or gasification. Therefore, if this biomass were used to produce energy, it could not only help mitigate the problem of the rising demand of energy predicted for the next years but also reduce the negative environmental impact caused by these residues. This is further supported if the calorific power of the rice husk is considered (12 to 18 MJ/kg) (KARMAKAR et al., 2013), which is not one of the biggest but can generate a considerable amount of heat.

Considering all that has been stated, it becomes important to better understand how this mixture between sand and rice husk behaves inside the fluidized bed. Among the many variables involved in this process, the minimum fluidization velocity is one of the most important design parameters (Rezaei, Sokhansanj and Lim 2018) Consequently, equations and empirical models that may help predict it will probably shorten the design process and

decrease the resources spent to develop or build a new fluidized bed.

Even though that there have been studies concerning prediction models of the minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ) for biomass (Agu, Pfeifer and Moldestad 2019; Paudel and Feng 2013; Pecora et al. 2013; Rasteh, Farhadi and Ahmadi 2018; Rezaei, Sokhansanj and Lim 2018), not many works focus on models related to rice husk fluidization.

## 2 | OBJECTIVES

The objective of this work is to test and compare two of these prediction models available in the literature and compare them to experimental results.

## 3 | MATERIAL AND METHODS

The particulates that compose the bed of the fluidization system are sand and rice husk in natura. The characteristics of both are described in Table 1. This information is important not only to evaluate the results obtained from the experiment but also to be able to calculate the theoretical minimum fluidization velocity. The diameter of the particles is only a standard average of the granulometric distribution.

Material	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Rice husk	1400	500
Sand	325	2550

Table 1. Characteristics of sand and rice husk

The experiment was conducted in a cold fluidized bed as shown in Fig. 1. The acrylic part of the bed has a height of approximately 0.7 m and a diameter of 0.156 m. The distributor used was a perforated plate. The gas velocity was measured using an orifice plate and the pressure was measured with pressure sensors fabricated by BOSCH. The mass of the sand used in the experiment was of 2 kg and the mass of the rice husk was of 0.02 kg and 0.1 kg, 1% and 5% of the sand, respectively. These values were chosen due to experimental limitations, especially because, for higher values of rice husk, the quality of the fluidization begins to decrease, making the experimental determination of the minimum fluidization velocity much more complex and difficult.

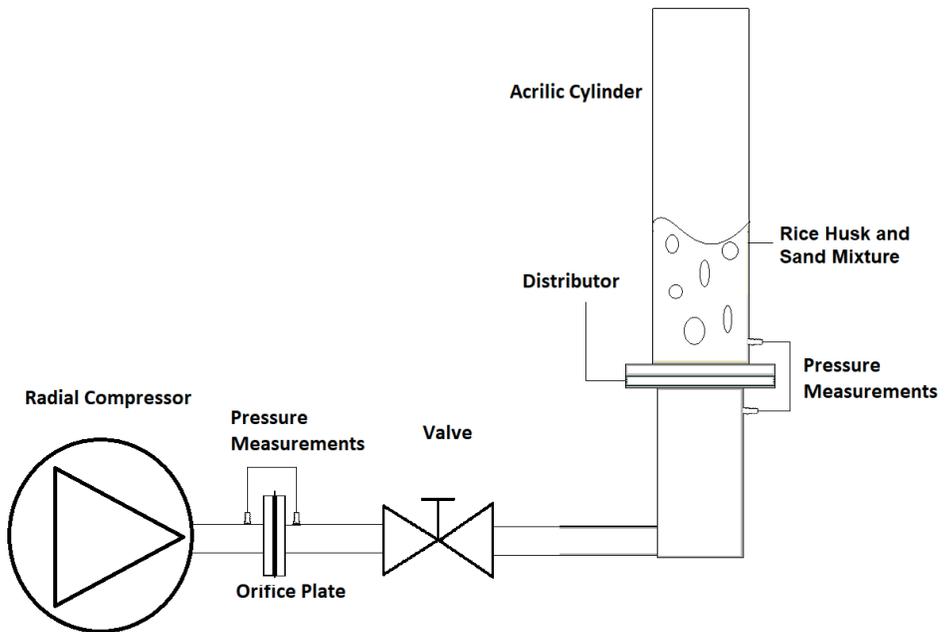


Figure 1. Fluidization system used in the experiments

In order to determine the minimum fluidization velocity, the velocity of the air being injected in the fluidized bed was steadily increased while the pressure at the bottom of the fluidized bed was measured. When the pressure at the bed stabilizes and stops increasing with the increase in the air flow, the bed has reached a state of fluidization. The velocity in which this change and stabilization occurs is considered the minimum fluidization velocity. This velocity is determined in the curve obtained from this process of increasing the velocity of the air, the same procedure realized by Rao and Bheemarasetti (2001) and Qiaoqun et al. (2005). However, in these experiments, the  $U_{mf}$  is obtained from the defluidization curve, in which the velocity of the air is decreased from its maximum value to zero. This is done to avoid the possible instabilities created by the heterogeneous mixture in the fluidization curve. Therefore, the same process will be used in this work and the minimum fluidization velocity will be determined using the defluidization curve.

In Table 2 is shown the correlations used to compare to the values obtained from the experimental results. It was used an older prediction model from Rao and Bheemarasetti (2001) and a relatively recent correlation from Paudel and Feng (2013).  $U_{mf}$  is the minimum fluidization velocity,  $d$  is the diameter of the particle,  $\rho$  is the density,  $x$  is the mass proportion of the mixture,  $\mu$  is the viscosity,  $Re$  is the Reynolds Number,  $Ar$  is the Archimedes Number,  $w$  is the weight,  $k$  is a correction factor and  $g$  is the gravity. The subscripts determine the material that is being considered, in which  $_b$  is for biomass,  $_s$  is sand,  $_{eff}$  is the effective value of the mixture and  $_{mf}$  is the minimum fluidization state.

Correlation	Equations	
Rao and Bheemarasetti (2001)	$U_{mf} = \frac{d_{eff}^2(\rho_{eff} - \rho_{air}) g}{1650 \mu_{air}}$	(1)
	$\rho_{eff} = x_b \rho_b + x_s \rho_s$	(2)
	$d_{eff} = k \left\{ d_s \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho_b} \right) \left( \frac{d_b}{d_s} \right) \right]^{w_b/w_s} \right\}$	(3)
	$k = 2000 d_s + 0.36$	(4)
Paudel and Feng (2013)	$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu}{d_{eff} \rho_{air}}$	(5)
	$Re_{mf} = \{30.28^2 + [0.046(1 - x_b) + 0.108x_b^{0.5}]Ar\}^{0.5} - 30.28$	(6)
	$Ar = \frac{d_{eff}^3 \rho_{air} (\rho_{eff} - \rho_{air}) g}{\mu_{air}^2}$	(7)
	$\frac{1}{\rho_{eff}} = \frac{x_b}{\rho_b} + \frac{x_s}{\rho_s}$	(8)
	$d_{eff} = d_b d_s \left[ \frac{x_b \rho_s + x_s \rho_b}{x_b \rho_s d_s + x_s \rho_b d_b} \right]$	(9)

Table 2. Correlations used to determine the minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ )

## 4 | RESULTS AND DISCUSSION

The experiments were executed and the curves obtained, which can be visualized in Figure 2 and Figure 3, showing the fluidization and defluidization process as well as the duplicate of 1% and 5% of rice husk, respectively.

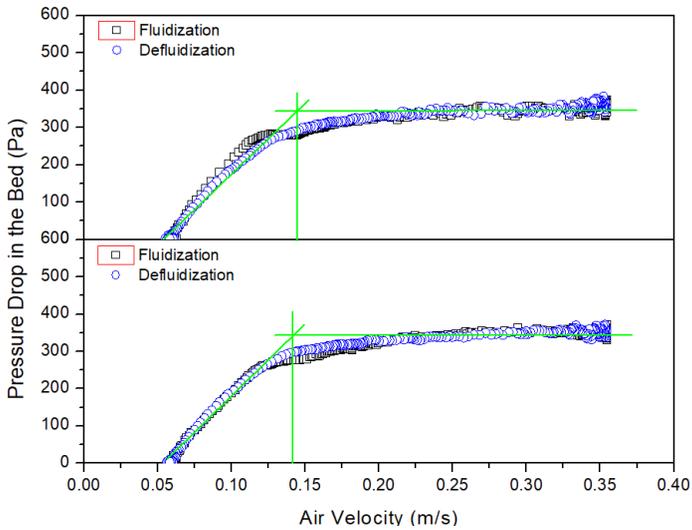


Figure 2. Fluidization and Defluidization curves (with duplicate) of 1% of rice husk and 2 kg of sand

It is possible to notice that the values of the minimum fluidization velocity are very close to their duplicate, for both proportions of rice husk. The effect of the heterogeneous mixture in the fluidization curve can be clearly visualized, especially in the 5% rice husk mixture. In this biomass proportion, the behavior of the curve starts to differ from the defluidization curve.

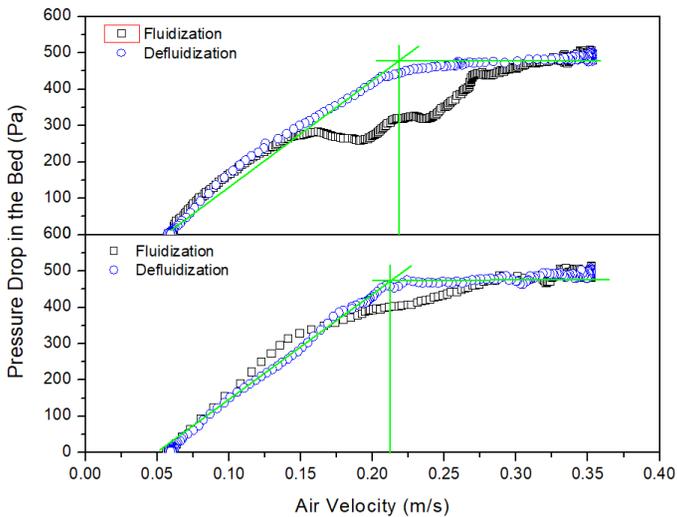


Figure 3. Fluidization and Defluidization curves (with duplicate) of 5% of rice husk and 2 kg of sand

The minimum fluidization velocity is an average from the values obtained from both curves in each rice husk proportion, resulting in velocities of  $U_{mf} 1\% = 0.145$  m/s for 1% and  $U_{mf} 5\% = 0.216$  m/s for 5% of rice husk.

The correlations given by Rao and Bheemarasetti (2001) and Paudel and Feng (2013) were used to generate two different curves, using the same proportions of rice husk (1% and 5%) used in the experimental procedure. The third curve was constructed using the data obtained from the experiments. The results are shown in Fig.4.

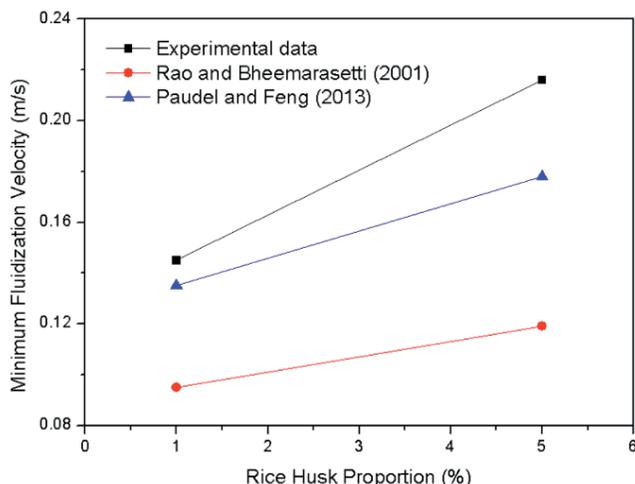


Figure 4. Minimum fluidization velocities obtained from the correlations and the experiments for 1% and 5% rice husk

Both correlations underestimate the minimum fluidization velocity of the mixture, although the one proposed by Rao and Bheemarasetti (2001) is more imprecise if compared to the correlation of Paudel and Feng (2013). It is also possible to see that for a small amount of rice husk (1%), the most recent prediction model (2013) is considerably accurate. However, for a higher proportion of rice husk, the prediction model begins to show a possible reduction of precision.

## 5 | CONCLUSÕES

The minimum fluidization velocity is one of the main variables in a fluidized bed, important not only to better understand the fluidization behavior of different mixtures but also to aid in the design of future fluidized beds used for thermochemical conversion of biomass, including rice husk. Therefore, in this work, the minimum fluidization velocity obtained experimentally for mixtures of 2 kg of sand and 1% and 5% of rice husk, respectively, are compared to two empirical correlations available in the literature, suggested by Rao and

Bheemarasetti (2001) and Paudel and Feng (2013). The results show that both models underestimate the values for both proportions, but this effect is increased for higher proportions of rice husk. Considering the data collected, the most precise model for rice husk in the proportions tested seems to be the one proposed by Paudel and Feng (2013).

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Agu, C. E.; Pfeifer, C.; Moldestad, B. M. E. Prediction of void fraction and minimum fluidization velocity of a binary mixture of particles: Bed material and fuel particles. *Powder Technology*, 2019.
- Karmakar, M. K. et al. Investigation of fuel gas generation in a pilot scale fluidized bed autothermal gasifier using rice husk. *Fuel*, v. 111, p. 584–591, 2013.
- Paudel, B.; Feng, Z. G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. *Powder Technology*, v. 237, p. 134–140, 2013.
- Pecora, A. et al. ESTUDO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO PARA MISTURAS BINÁRIAS BIOMASSA-AREIA. n. October 2016, 2013.
- Qiaoqun, S. et al. Simulation and experiment of segregating/mixing of rice husk-sand mixture in a bubbling fluidized bed. *Fuel*, v. 84, n. 14–15, p. 1739–1748, 2005.
- Rao, T. R.; Bheemarasetti, J. V. R. Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands. v. 26, p. 633–644, 2001.
- Rasteh, M.; Farhadi, F.; Ahmadi, G. Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds. *Powder Technology*, v. 338, p. 563–575, 2018.
- Rezaei, H.; Sokhansanj, S.; Lim, C. J. Minimum fluidization velocity of ground chip and ground pellet particles of woody biomass. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 124, n. December 2017, p. 222–234, 2018.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PARA AVALIAÇÃO DOS ATUAIS PROCESSOS DE SECAGEM DE GRÃOS

*Data de aceite: 01/03/2021*

**José Roberto Rasi**

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

**Mario Mollo Neto**

Universidade Estadual de Campinas -  
UNICAMP

**Roberto Bernardo**

Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

**RESUMO:** O acréscimo da produção de grãos causa aumento significativo na demanda por locais adequados para receber e armazenar esses produtos por um período de tempo maior e conservar as propriedades dos grãos colhidos. O sistema de secagem nas unidades armazenadoras tem se tornado o gargalo da recepção de grão. Uma das soluções para diminuir os gargalos na recepção das unidades armazenadoras de grãos é a adoção da operação de seca-aeração. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica de secagem de grãos e do sistema de secagem denominado seca aeração, baseado em uma prospecção em bases dados textuais e referenciais de bom fator e impacto. A utilização do sistema seca aeração permite aumentar o fluxo na recepção das unidades armazenadoras que comparado com os métodos convencionais de secagem, gera aumento acima de 50% na capacidade do secador, reduz o consumo de energia em até 30%, retirada de até 2 % de umidade adicional do grão e proporciona grãos menos susceptíveis

à quebra e rachaduras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Métodos de secagens, secadores, seca aeração.

**ABSTRACT:** The increase in grain production causes a significant increase in the demand for suitable places to receive and store these products for a more extended time and preserve the harvested grains' properties. The drying system in the storage units has become the bottleneck for grain reception. One solution to reduce bottlenecks in the reception of grain storage units is the adoption of the dry-aeration operation. This work aims to present a bibliographic review of grain drying and the drying system called dryeration, based on prospecting in textual and referential databases of good factors and impact. The use of the dryeration system allows to increase the flow in the reception of the storage units, which, compared with conventional drying methods, generates an increase of over 50% in the capacity of the dryer, reduces energy consumption by up to 30%, removing up to 2% additional grain moisture and provides grains less susceptible to cracking and cracking.

**KEYWORDS:** Drying methods, dryer, dryeration.

### 1 | INTRODUÇÃO

As modificações advindas do processo de modernização com inserção de inovações tecnológicas resultaram na melhoria da produtividade da agricultura no Brasil gerando um grande aumento da produção de alguns tipos de grãos como a soja e o milho, tornando

o país em um dos maiores produtores mundiais dos agronegócios, batendo recordes consecutivos de produção, safra a safra (RASI *et al*, 2020 a).

A nova safra 2020/2021 deve superar em 4,2% o recorde obtido na temporada recém finalizada. A produção de grãos está estimada em 268,7 milhões de toneladas, superando em cerca de 11 milhões de toneladas o recorde de 257, 7 milhões de toneladas da última safra. A produção de soja é estimada em 133,7 milhões de toneladas e mantém o Brasil como maior produtor mundial da oleaginosa e a produção de milho deve atingir 105,2 milhões de toneladas, considerada a maior safra destes grãos, com aumento de 2,6% sobre a safra anterior (CONAB, 2020).

O acréscimo da produção de grãos causa aumento significativo na demanda por locais adequados para receber e armazenar esses produtos por um período de tempo maior e conservar as propriedades dos grãos colhidos (BARONI *et al*, 2017). Os grãos costumam ser colhidos com um teor de umidade muito alto para um armazenamento seguro e a secagem é o processo pós-colheita mais comum realizado para a preservação de grãos a longo prazo (BUCKLING *et al*, 2013).

O aumento na produção acarreta a secagem desses grãos em níveis mais altos que a recomendada para armazenamento seguro nas unidades armazenadoras coletoras próxima as unidades de produção de grãos (fazendas), uma vez que devido ao grande volume recebidos, o sistema de secagem existente de grãos se mostra subdimensionado (CORADI *et al*, 2016).

Elias *et al* (2017) afirma que a operação de secagem de grãos costuma ser o gargalo que limita a capacidade de recebimento de uma unidade armazenadora.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão do sistema de secagem denominado “seca aeração” (relatado na literatura ou em outras fontes documentais) e discutir suas principais características, os quais permite aumentar o fluxo na recepção das unidades armazenadoras, que comparado com os métodos convencionais de secagem, gera aumento acima de 50% na capacidade do secador, reduzem o consumo de energia em até 30%, provem a retirada de até 2 % de umidade adicional do grão e proporciona grãos menos susceptíveis à quebra e rachaduras.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Com a finalidade de fazer um levantamento nos trabalhos realizados sobre secagem de grãos, apresenta-se uma pesquisa bibliográfica de natureza qualitativa (Ludke e Andre, 1986) das produções acadêmico científico de bom fator de impacto, publicados nas bases de dados textuais e referenciais disponível na Internet. Em nosso país existem poucos trabalhos que abordam o tema e a grande maioria é publicada em periódicos internacionais. As buscas foram executadas pelos títulos dos artigos, dissertações e teses, com leitura inicial dos resumos e nos casos específicos, leitura integral do documento.

Após análise gradativa, constrói-se o quadro de referência teórica que sustenta as conclusões deste trabalho (KÖCHE, 2011).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Secagem de grãos

Dentre os métodos utilizados para conservação de grãos, a secagem é o mais econômico não só sob o ponto de vista de processamento, mas, também por permitir a preservação do produto em ambiente natural durante um longo período de tempo (SOUZA *et al*, 2002). A microflora e os insetos normalmente só desenvolvem nos grãos em umidades relativas de equilíbrio acima de 65% (Christensen e Kaufmann, 1974). De acordo com Navarro e Noyes (2002), os grãos com alto teor de umidade deve ser secos artificialmente até um teor de umidade em que resultará em uma umidade relativa de equilíbrio dentro da massa de grãos armazenada inferior a 65 %.

A Tabela 1 resume o teor de umidade de equilíbrio em três níveis de umidade relativa de equilíbrio e uma temperatura de 25° C.

Tipo de grão	Teor de umidade de equilíbrio (%)		
	60	65	70
Milho	12,4	13,2	14,0
Soja	10,5	11,5	12,5
Arroz em casca	12,0	12,6	13,2
Trigo (duro)	12,9	13,6	14,4
Trigo (mole)	11,8	12,3	13,0

Tabela 1 - Teor de umidade de equilíbrio (base úmida) de vario grãos

Fonte: Buckling *et al*, 2013

O principal objetivo em uma operação de secagem é o fornecimento do calor necessário de uma maneira ideal, a fim de produzir a melhor qualidade do produto com mínimo gasto total de energia (LUTFY *et al*, 2008). A remoção da umidade ocorre, geralmente pela evaporação da mesma por transferência de massa e calor entre as fases sólidas e gasosas (RASI *et al*, 2020 b).

Segundo Park *et al* (2007), a evolução dessas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos descritos a seguir. Na Figura 1 são apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da sua

velocidade de secagem ( $dX/dt$ ), denominada taxa de secagem.

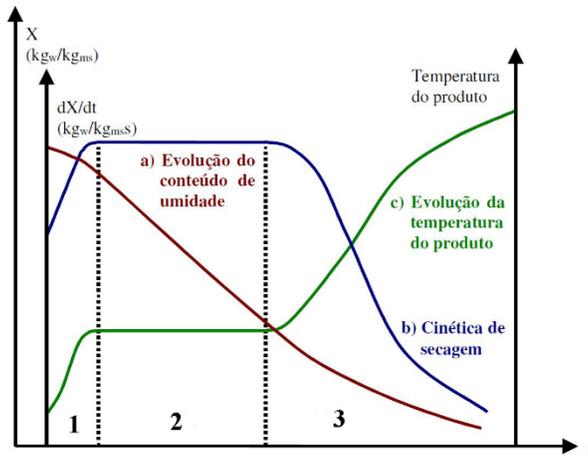


Figura 1 – Curva de secagem

Fonte: Park *et al*, 2007

Segundo os autores, nesta Figura1, a curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem; a curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto e a curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem. Descrevem, então, Park *et al* (2007) os três períodos:

- Período 1

Em fase inicial de secagem onde, inicialmente, os grãos estão mais frios que o ar, a pressão parcial de vapor de água na superfície do produto é baixa e, a transferência de massa e velocidade de secagem também são baixas. O calor eleva a temperatura do produto ocorrendo um aumento da pressão e da velocidade de secagem. Esse fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior a temperatura do produto, esta diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é muito pequena em relação ao período total de secagem, mudando-se gradativamente para o período 2.

- Período 2

É o período onde a taxa (velocidade) de secagem é constante. Durante este período, a quantidade de água disponível dentro dos grãos é muito grande. A água evapora como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual a pressão de vapor de água pura à temperatura do produto.

A temperatura do produto também é constante e é igual à temperatura do bulbo úmido, característica do fato de que a transferência de calor e de massa se compensam

exatamente. Esse período dura enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para suprir a perda por evaporação de água na superfície.

- Período 3

É o período de velocidade (taxa) decrescente de secagem. A partir do momento que a água começa a ser escassa na superfície do grão e a velocidade de secagem decresce. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, aumentando a temperatura dos grãos e tende assintoticamente à temperatura do ar. No final deste período a velocidade (taxa) de secagem é nula.

De acordo com Tunnermann (2018), O calor é a energia que flui devido à diferença de temperatura, que no nosso trabalho, ocorre entre o ar de secagem e os grãos. O calor específico é uma característica de cada material ou fluido. Quanto maior o calor específico de uma substância, maior é a energia necessária para variar a sua temperatura.

O mesmo autor destaca ainda que o calor sensível é aquele que adicionado ou removido de uma substância, ocasiona mudança de temperatura sem causar mudança de fase, ou seja, apenas modifica a temperatura da substância. O calor sensível está relacionado com o conceito de capacidade térmica, que corresponde a quantidade de calor necessário que a massa total de um corpo precisa receber ou perder para que a sua temperatura se altere em um grau centígrado. Já o calor latente é a quantidade de calor fornecido ou retirado de um corpo, não altera a sua temperatura, mas causa mudança em seu estado de agregação.

Quando um produto está sendo submetido ao processo de secagem, a água é extraída no formato de vapor pela ação do calor. Este vapor cede uma determinada quantidade de calor, chamada calor latente de vaporização (TRINDADE, 2013).

De maneira simples, Silva *et al* (2010) afirmam que o calor sensível fornecido pelo ar é igual ao calor latente de vaporização necessário para evaporar a água contida nos grãos até a umidade final desejada. Deste modo, calor sensível é convertido em calor latente, e esta conversão pode ser representada pela equação 1:

$$60 \cdot \left(\frac{Q}{V_e}\right) \cdot C_a \cdot (T_a - T_e) \cdot t = h_v \cdot MS \cdot (U_o - U_e) \quad \text{Eq (1)}$$

Onde:

Q: vazão de ar de secagem (m<sup>3</sup>/min);

V<sub>e</sub>: volume específico do ar de secagem (m<sup>3</sup>/kg ar seco);

C<sub>a</sub>: calor específico do ar (kcal/kg °C);

T<sub>a</sub>: temperatura do ar de secagem (°C);

T<sub>e</sub>: temperatura de equilíbrio (°C);

t: tempo de secagem (h);

h<sub>v</sub>: calor latente de vaporização (kcal/kg água);

MS: matéria seca existente no produto (kg);

$U_o$ : umidade inicial (decimal, b.s.);

$U_e$ : umidade de equilíbrio (decimal, b.s.).

De acordo com Silva (2005), os grãos são produtos hidrocópicos e podem ceder ou receber vapor de água do ar que os envolve. Segundo o autor, em sua superfície é formada uma fina camada de ar que constitui um micro clima, cujas condições de estado são reguladas pela temperatura e teor de umidade do produto. Destaca ainda que o ar que circunvizinha os grãos, também possui a sua umidade relativa que está relacionada à quantidade de vapor diluída no ar.

O sentido e a intensidade do fluxo de vapor de água entre os grãos e o ar, de acordo com indicações de Silva 2005, dependem da diferença dos valores de umidade relativa do microclima do grão ( $UR_g$ ) e do ar circunvizinho ao grão ( $UR_{ac}$ ).

Assim tem-se as seguintes situações:

- $UR_g > UR_{ac}$  Ocorre secagem dos grãos;
- $UR_g < UR_{ac}$  Ocorre umedecimento dos grãos, e
- $UR_g = UR_{ac}$  Ocorre equilíbrio hidrocópico, não há fluxo de vapor

O sentido do fluxo de vapor de água será sempre do lugar de maior valor de umidade relativa para o de menor valor (Figura 2).

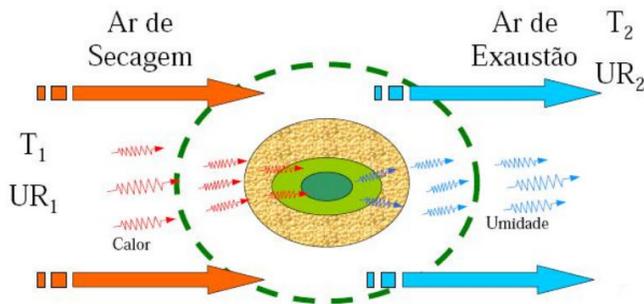


Figura 2 – Demonstração do processo de secagem em grão.

Fonte: Sulzbacker, 2013

O calor é normalmente fornecido durante a secagem pelo aquecimento do ar, quer artificialmente ou por meios naturais, e a pressão de vapor ou gradiente de concentração assim criado causa o movimento da umidade de dentro do *kernel* (núcleo do grão) para a superfície. A velocidade e a eficiência da secagem dependem da temperatura e umidade do ar de secagem (PARDE *et al*, 2003).

Segundo Montross e Maier (2000), a eficiência energética e a capacidade aumentam

conforme aumenta a temperatura do ar de secagem. Segundo os autores, a forma mais correta de diminuir a umidade relativa do ar de secagem é pelo aquecimento, que pode ser de forma natural por meio da radiação solar ou de forma artificial utilizando fornalhas a lenha ou biomassa, queimadores a gás ou radiadores a vapor. Destacam ainda que aumentando muito a temperatura do ar de secagem leva a uma diminuição na qualidade do grão devido ao aparecimento de trincas.

### 3.2 Sistemas de secagem

De acordo com Garcia et al (2004), os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa de sementes (estacionário ou contínuo). Já Silva *et al* (2010) classificaram os sistemas de secagem de produtos agrícolas por questão didática, devido à inexistência de uma classificação oficial, conforme o Quadro 1:

<b>Sistema de secagem</b>	<b>Natural - no campo, na própria planta</b>				
	<b>Artificial</b>	<b>Ventilação natural</b>	Terreiros e palóis		
			Secagem Solar		
			Outros		
		<b>Ventilação forçada</b>	<b>Altas Temperaturas</b>	<b>Ar natural</b>	
				<b>Quanto ao fluxo</b>	Camada fixa
					Cruzados
					Concorrentes
					Contra corrente
					Cascata
					Rotativo
					Fluidizado
					Solar híbrido
<b>Quanto à operação</b>	Intermitentes				
Contínuos					
Baixas Temperaturas					
Sistemas Combinados					
Seca aeração					
<b>Convecção</b>					

Quadro 1 – Sistemas de secagem

Fonte: Silva *et al*, 2010

De acordo com Reykdal (2018), a classificação mais simples dos métodos de secagem de grãos é baseada na temperatura do ar usado para a secagem e podem ser classificados em:

- Secagem ao ar natural
- Secagem artificial com baixas temperaturas
- Secagem artificial com altas temperaturas

Silva (2008) afirma que a secagem artificial com altas temperaturas é uma técnica

muito utilizada em fazendas, indústrias de transformação, unidades armazenadoras coletoras e intermediárias do mundo inteiro. Este tipo de secagem é a mais rápida e independe das condições climáticas do local.

Segundo Oliveira (2014), para médias e grandes quantidades de grãos são recomendáveis os sistemas tecnificados de secagem (sistema de secagem artificial com ventilação forçada), os quais podem ser classificados em estacionários (de fluxo de ar axial ou radial), convencionais (contínuos ou intermitentes) e mistos (seca aeração). Dentre estes, o secador mais utilizado no Brasil é o convencional de fluxo contínuo ou tipo cascata (SILVA, 2005).

### 3.2.1 Secador convencional de fluxo contínuo

Para Santana (2020), os secadores convencionais de fluxo contínuo, também denominado de secador tipo cascata, são os mais populares porque contribuem para uma melhor uniformidade de secagem em toda a coluna de grãos, uma vez que toda a largura é submetida ao mesmo ar e o grão é misturado à medida que passa pelo secador. Weber (2005) afirma que no secador convencional contínuo, o ar de secagem é distribuído na parte superior da coluna de secagem, com 2/3 da altura da coluna e o ar frio (ar ambiente) é distribuído na parte inferior da coluna de secagem, cujo objetivo é retirar calor da massa do grão (Figura 3).

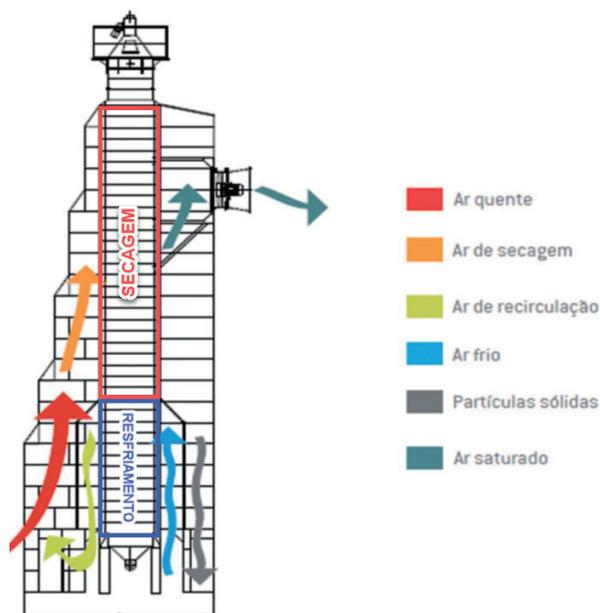


Figura 3 – Secador de grãos convencional de fluxo contínuo.

Fonte: SMA Metalúrgica Ltda, 2020

O resfriamento rápido dentro do secador de fluxo contínuo resulta em um aumento significativo nas fissuras por estresse e suscetibilidade à quebra (Foster e Thompson, 1961), gerando problemas ambientais devido a emissão de grande quantidade de particulados na forma de cascas e pequenos pedaços de grãos, contaminando o entorno do setor de recepção e secagem (RASI, 2009; SILVA 2015).

### 3.2.2 Sistemas de secagem seca aeração

A seca aeração foi introduzida como um método para aumentar a capacidade do secador (utiliza toda a coluna como câmara de secagem), melhorar a eficiência energética e aumentar a qualidade dos grãos (FOSTER, 1964).

Segundo Rocha (2010), o método de seca-aeração de grãos foi criado nos Estados Unidos na década de 60 por George Foster, professor do Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade de Purdue, Indiana. As pesquisas com o novo processo de secagem denominado seca aeração (*Dryeration*) começou em 1962 sendo a primeira informação foi relatada na pesquisa da revista *Purdue Farm Science Days*, em janeiro de 1964 (MCKENZIE et al., 1967).

A seca aeração consiste a secagem com um secador convencional contínuo de alta capacidade, acumulados em um silo metálico vertical para equalização de temperatura, seguido de resfriamento no mesmo silo antes da transferência para o armazenamento final (Figura 4).

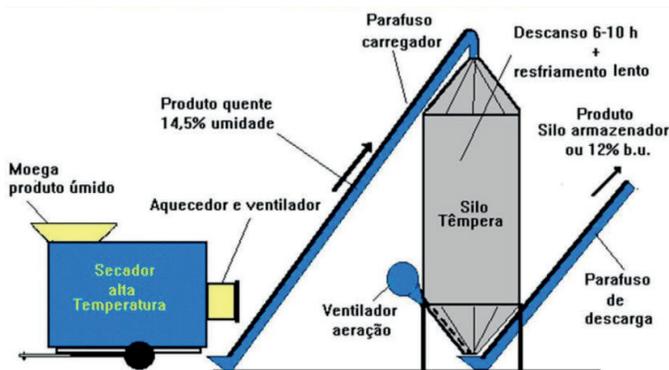


Figura 4 – Sistema de seca aeração

Fonte: Agromove, 2020

Segundo Montross e Maier (2000), esse sistema aumenta a capacidade de secagem em 50 a 75% devido a uma série de fatores: eliminando o resfriamento dentro do secador, onde toda a coluna é usada como câmara de secagem, removendo menos umidade, e um significativo aumento na quantidade de ar aquecido usado no secador.

Weber (2005) a grande importância do sistema seca aeração está no aumento da

capacidade real dos secadores, fazendo que diminuam os problemas de recebimento no pico da safra, as filas junto às moegas de descarga de grãos. O mesmo autor afirma ainda que o sistema representa os seguintes ganhos:

- Significativo aumento de capacidade do secador pois é muito mais rápido secar uma carga de grãos de uma umidade inicial qualquer até 16% (b.u.) do que até 13%. Esses 3% de umidade a menos que o secador deixa de remover, pode significar pouca água retirada, mas representa muito tempo de secagem por se tratar de umidade que terá de migrar do centro do grão para a sua periferia.
- Ganho de capacidade uma vez que o secador não resfria os grãos na câmara de resfriamento que se tornou câmara de secagem, aumentando assim em 33% (ou 1/3) a capacidade de secagem.

Pelo fato que ventilação forçada para resfriamento dos grãos ocorrerem após de tempo razoável e em camada grande de grãos, praticamente não há desprendimentos de cascas e outros resíduos sólidos, contribuindo para a melhoria ambiental do entorno.

A Figura 5 mostra secador convencional de fluxo contínuo, adaptado para o sistema de seca aeração, ao lado de um secador convencional, funcionando com câmara de secagem no corpo inteiro do secador, sem a câmara de resfriamento. Essa adaptação consiste apenas na retirada das chapas direcionadoras de ar ambiente, junto à câmara de resfriamento e o fechamento de entrada de ar ambiente para o secador, com custos insignificante frente ao custo de aquisição do secado. Deste modo, a câmara de resfriamento passa a receber ar de secagem, transformando-a também em câmara de secagem.

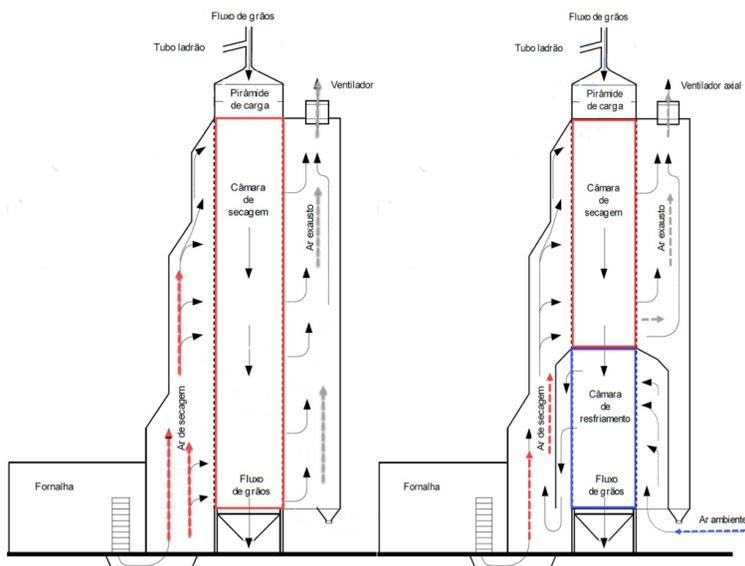


Figura 5 – Secador de grãos convencional de fluxo contínuo adaptado para seca aeração ao lado de secador convencional com câmara de resfriamento.

Fonte: Adaptado de Silva, 2005

O grão é descarregado quente entre 43 e 54 ° C do secador para um silo vertical metálico separado sem resfriamento inicial e com umidade com dois ou três pontos percentuais acima do desejado. Após repouso de equalização por 8 a 12 h, o grão é resfriado com ar ambiente a uma taxa de fluxo de ar de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup> / min x ton. O resfriamento retardado permite que uma grande porcentagem do calor sensível do milho seja usada para evaporar parte do restante umidade existente.

### 3.2.2.1 Consumo de energia

Comparada com os métodos convencionais, a seca-aeração reduz de 15 a 30 % o consumo de energia, aumentando acima de 50 % a capacidade do secador (SAUER, 1992). No caso específico de secagem de milho, em um sistema de seca aeração, corretamente projetado, Silva *et al* (2010) afirmam que para redução de 25% para 15% (b.u.) no teor de umidade, resulta em um aumento em torno de 50% na capacidade dos secadores comerciais e, conseqüentemente em uma redução de 20 a 30% no consumo de combustíveis gasto por tonelada de produto seco. A Tabela 2 as temperaturas do ar de secagem para cada sistema de secagem, demonstrando a menor temperatura utilizado no sistema seca aeração (ELIAS *et al*, 2017).

Grão	Sistema de secagem		
	Intermitente	Contínuo	Seca aeração
Arroz	70-115		60-80
Trigo	70-110	70-120	70-90
Milho	80-120	90-130	79-90
Soja	80-120	90-130	79-90
Feijão	80-100	80-110	60-80

Tabela 2 – Temperatura (°C) do ar de secagem na entrada do secador em diferentes sistemas

Fonte: Elias *et al*, 2017

McKenzie et al., (1967) verificaram que o método de seca-aeração proporcionava um aumento na cadência operacional do secador, melhorava o aproveitamento das instalações e proporcionava redução nos custos com energia na secagem.

### 3.2.2.2 Qualidade de secagem

Segundo Villela (1991), os grãos sofrem mudanças físicas, provocadas por gradiente de temperatura e umidade, que ocasionam expansão, contração, alteração na densidade e na porosidade, durante o processo de secagem convencional (contínua). O processo de secagem convencional aumenta significativamente o percentual de grãos quebrados, e pode provocar fissuras internas ou superficiais, tornando-as mais suscetíveis à quebra

durante a limpeza e armazenamento.

McKenzie *et al* (1972) destacam que o índice de grãos quebrados na secagem convencional foi de 43,6% enquanto que na seca aeração foi de 7,60%, com redução significativa dos danos nos grãos.

Gustafson e Morey (1979) analisaram as variáveis que podem contribuir para mudanças na qualidade do grão durante a secagem. Eles verificaram que o resfriamento retardado dos grãos, no processo de seca aeração, reduz efetivamente a possível suscetibilidade à quebra comparado com a secagem e resfriamento convencionais, em um secador contínuo.

### 3.2.2.3 Considerações ambientais

De acordo com Marques (2006), o principal fator que pode influenciar a sustentabilidade energo-ambiental da agroindústria brasileira é a alta dependência por energia térmica no pré processamento de grãos, principalmente na secagem. Segundo Errera *et al* (2002), estudos realizados no Estado do Paraná apontam a lenha como principal combustível utilizado na secagem dos grãos, podendo atingir cerca de 85% do total demandado.

Marques (2006) afirma ainda que o uso da lenha em grande escala como fonte energética requer atenção para as formas de obtenção deste energético uma vez que seria necessário a implantação de grandes áreas de reflorestamento em monocultura que levam a outros problemas ambientais de ordem ecológica, como a diminuição da biodiversidade.

### 3.2.2.4 Desvantagens do sistema seca aeração

As desvantagens da seca aeração são o aumento de manuseio de grãos e de equipamento adicional necessário para têmpera (equalização). Os silos precisam ser equipados com ventiladores maiores para forneça fluxos de ar de pelo menos 0,5 m<sup>3</sup> / min x ton. A tabela 3 mostra a comparação de valores de fluxo de ar indicados por tipo de instalação de secagem (SILVA, 2016).

<b>Tipo de instalação</b>	<b>Fluxo de ar</b> (m <sup>3</sup> / min.ton de produto)
Aeração - Armazem plano	0,10 a 0,20
Aeração - Silo	0,03 a 0,10
Aeração - Silo pulmão	0,30 a 0,50
Seca aeração	0,50 a 1,00
Resfriamento	mínimo 0,12

Tabela 3 – Recomendação de fluxo de ar para aeração.

Fonte: Silva, 2016

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A secagem desempenha um papel importante na melhoria da qualidade dos produtos agrícolas, melhorando as condições de armazenamento e aumentando o tempo de armazenamento.

Devem-se buscar métodos de secagem que minimizem o consumo de combustíveis com aumento de rendimento térmico e tenha baixa degradação ambiental, visando reduzir o custo de secagem, aumento do fluxo de secagem e preservação dos recursos do meio ambiente.

O sistema de seca aeração tem apresentado, ganhos significativos em capacidade de secagem, aumento da eficiência energética com diminuição de consumo de combustível, melhoria qualidade do produto com diminuição significativa do percentual de quebra de grãos e redução do impacto ambiental devido à secagem.

## REFERÊNCIAS

Agromove, 2020. Disponível em: <https://blog.agromove.com.br/pos-colheita-da-soja-a-importancia-desta-etapa-na-cultura-mais-produzida-do-brasil/>

Baroni, G. D., Benedeti, P. H., Seidel, D. J. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. Revista Thema - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul), vol. 14, nº. 4, Pelotas, 2017 <http://dx.doi.org/10.15536/thema.14.2017.55-64.452>

Buckling, R., Thompson, S., Montross, M., Abdel-Hadi, A. Grain Storage Systems Design, Handbook of Farm (Second Edition), Chapter 7. Dairy and Food Machinery Engineering, ScienceDirect, 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00007-0>

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3652-producao-de-graos-deve-superar-268-milhoes-de-toneladas-na-safra-2020-21>

Coradi, P. C., Milane, L. V., Andrade, M. G. O, Camilo, L. G, Souza, A. H. S. Secagem de grãos de milho do cerrado em um secador comercial de fluxos mistos. Brazilian Journal of Biosystems Engineering vol. 10, nº 1, Chapadão do Sul, 2016.

Cristiansen, C. M., Kaufmann, H. H. Microflora. In: Storage of Cereal Grains and Their Products, second ed. Amer. Assoc. of Cereal Chemists, St. Paul, 1974.

Elias, M. C., Oliveira, M., Vanier, N. L. Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos. Lab de Pós Colheita – UFPel, 2017. Disponível em: <http://labgraos.com.br/manager/uploads/arquivo/material---prova-1.pdf>

Errera, M.R., Stanesco G. and Filipini, F.A. Relatório parcial em tecnologia de processamento de soja e o potencial de integração de cogeração para o gás natural, Projeto FINEP/CETPETRO #0660/01, UFPR, Curitiba, 2002.

Foster, G. H. e Thompson, R. A. Stress cracks in artificially dried corn. United State Department of Agriculture – Purdue University, 1961. <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/30200525/9%20Stress%20Cracks%20in%20Artificially%20Dried%20Corn.pdf>

Foster, G. H. Dryeration - A corn drying process. U.S. Dept. of Agriculture Marketing Service Bull. No. 583. Washington, 1964.

Friesen, O. H. Hated-air grain dryer. Publication 1700 – Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, 1980. Disponível em: <file:///C:/Users/1513%20IRON/Downloads/Aula06-2-grain-dryers.pdf>

Garcia, D. C., Barros, A. C. S. A., Peske, S. T., Menezes, N. L. A secagem de sementes. *Ciência Rural*, Santa Maria, vol. 34, n° 2, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200045>

Gustafson, R. J., Morey, R. V. Study of Factors Affecting Quality Changes During High-Temperature Drying. *Transactions of the ASAE* 0001 -2351/79, 1979. <https://doi.org/10.13031/2013.35128>

Köche, J. C. Fundamentos da metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. Editora Vozes, Petrópolis, RJ, 2011.

Ludke, M. & Andre, M. E. D. A. Pesquisas em educação: uma abordagem qualitativa. Editora E. P. U. F. São Paulo, 2013.

Lutly, O. F., Mohd Noor, S. B., Abaas, K. A., Marhaban, M. H. Some control strategies in agricultural grain driers: A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, vol. 6, n° 2, Finland, 2008. Disponível em: [https://www.academia.edu/2527201/Some\\_control\\_strategies\\_in\\_agricultural\\_grain\\_driers\\_A\\_rview](https://www.academia.edu/2527201/Some_control_strategies_in_agricultural_grain_driers_A_rview)

Marques, B. A. Considerações ambientais e exegérgicas na fase de pós-colheita de grãos: estudo de caso do Paraná. Dissertação de mestrado UFPR, 2006.

McKenzie, B. A., Foster, G. H., DeForest, S. S. Dryeration and bin cooling systems for grain. AE-107, Ind.: Cooperative Extension Service, Purdue University, 1967. Disponível em: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/AE/AE-107.html>

Mckenzie, B. A., Foster, G. H., Noyes, R. T., Thompson, R. A. Dryeration – better corn quality with high speed drying. *Cooperative Extension Service Bulletin*, Purdue University, 1972. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=agext>

Montross, M. D., Maier, D. E. Simulated performance of conventional high-temperature drying, dryeration, and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. *Transactions of the ASAE* 0001-2351/00, 2000. <https://doi.org/10.13031/2013.2751>

Navarro, S., Noyes, R. *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press, Boca Raton, 2002.

Oliveira, V. Avaliação energética e econômica da secagem de grãos utilizando secador de coluna com caldeira aquatubular. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.

Parde, S. R., Jayas, D. S., White, N. D. G. Grain drying: A review. *Sciences Des Aliments*, n° 23, Editora Lavoisier, 2003. Disponível em: [https://sda.revuesonline.com/gratuit/SDA23\\_5-6\\_589-622.pdf](https://sda.revuesonline.com/gratuit/SDA23_5-6_589-622.pdf)

Park, K. J; Antonio, G. C; Oliveira, R. A. Park, K. J. B. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Desenvolvimento de material didático – FEAGRI, Unicamp, 2007. Disponível em: [http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec\\_07.pdfprojpesq.html](http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdfprojpesq.html)

- Rasi, J. R. Proposta de programa de gestão ambiental para agroindústria. Monografia de especialização em Saneamento Ambiental. Universidade Gama Filho, Rio de Janeiro, 2009. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10409.21603>
- Rasi, J. R., Bernardo, Roberto., Mazer, Wellington., Serafim, J. A., Bachega, L. A. Proposal for Modular Precast Bulk Warehouse for Brazilian Agricultural. International Journal for Innovation Education and Research (IJIER), vol. 8, n°. 11, 2020. <https://doi.org/10.31686/ijier.vol8.iss11.2758>
- Rasi, J. R., Bernardo, Roberto., Peloso, J. A. C. Avaliação de um secador de bagaço de cana com dois estágios de secagem que utiliza o calor residual de um gerador de vapor: um estudo de caso. Brazilian Journal of Development, vol. 6, n° 8, Curitiba, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-155>
- Reykdal, O., Drying and storing of harvested grain – A review of methods. Skýrsla Matís 05-18, Iceland, 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14530.89286>
- Rocha, J. C. Da, Parâmetros industriais e tecnológicos do arroz na seca-aeração e no armazenamento. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2010.
- Santana, P. A., Lopes, D. C., Steidle Neto, A. J. High-temperature grain drying: an economic analysis applied to Brazilian conditions. Open Access Journal of Science, vol. 4, n° 1, 2020. Disponível em: <https://medcraveonline.com/OAJS/OAJS-04-00146.pdf>
- SAUER, D.B. Storage of cereal grains and their products. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1992.
- SMA Metalúrgica Ltda. Disponível em: <http://www.smasilos.com.br/>
- Silva, L. C. Unidades armazenadoras – Secagem de grãos. Boletim Técnico AG: 04/05, Universidade Federal do Espírito Santo, 2005. Disponível em: [www.agais.com](http://www.agais.com)
- Silva, L. C. Unidades armazenadoras – Impactos ambientais. Boletim Técnico AG: 09/05, Universidade Federal do Espírito Santo, 2015. Disponível em: [www.agais.com](http://www.agais.com)
- Silva, L. C. Unidades armazenadoras – Aeração de grãos armazenados. Boletim Técnico AG: 01/11, Universidade Federal do Espírito Santo, 2014. Disponível em: [www.agais.com](http://www.agais.com)
- Silva, L. C. Unidades armazenadoras – Impactos ambientais. Boletim Técnico AG: 01/11, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016. Disponível em: [www.agais.com](http://www.agais.com)
- Silva, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Editora Aprenda Fácil, Viçosa, 2008.
- Silva, J. S., Afonso, A. D. L., Donzelles, S. M. L. Pós colheita de produtos agrícolas: curso básico – Cap. 5 – Universidade Federal de Lavras, 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/1513%20IRON/Downloads/Cap%C3%ADtulo%205.pdf>
- Silva, J. S., Afonso, A. D. L., Donzelles, S. M. L. Estudo da secagem em camada espessa: curso básico – Cap. 6 – Universidade Federal de Lavras, 2010. Disponível em: [file:///C:/Users/1513%20IRON/Downloads/cap6%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/1513%20IRON/Downloads/cap6%20(1).pdf)

Silva, J. S., Lacerda Filho, A. F., Devilla, I. A., Lopes, D. C. Aeração de grãos – Cap. 11 – Secagem e armazenamento de produtos agrícola. Editora Aprenda Fácil, Viçosa, 2008/. Disponível em: [https://issuu.com/juarezufv/docs/cap\\_tulo\\_14\\_2013](https://issuu.com/juarezufv/docs/cap_tulo_14_2013)

Souza, C. M. A., Queiroz, D. M., Lacerda Filho, A. F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. Revista Scientia Agricola, v.59, n.4, p.653-660, 2002. Disponível em: <file:///C:/Users/1513%20IRON/Downloads/21780-Article%20Text-25412-1-10-20120528.pdf>

Sulzbacher, A. L. Monitoramento da secagem de milho em secador intermitente de coluna e cavalete. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pelotas, 2013.

Trindade, M. S. Secagem de soja em camada espessa: modelagem matemática e simulação numérica. Dissertação de mestrado. Universidade Regional Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.

Turnermann, H. Metodologia para dimensionamento de um equipamento para secagem da vagem verde de soja e seus resíduos. Dissertação de mestrado. Universidade de Passo Fundo, 2018.

Villela, F. A. Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade do milho. Tese de doutorado. ESALQ/USP, 1991. <https://doi.org/10.11606/T.11.20191220-122957>

Weber, E. A. Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos. Editora Salles, Canoas. 2005.

## IMPLEMENTAÇÃO DE UMA INTERFACE HÁPTICA PARA TESTES DE CONTROLE MOTOR. DESIGN E VALIDAÇÃO DE UMA NOVA INTERFACE MECÂNICA

Data de aceite: 01/03/2021

### **Adriano Augusto Antongiovanni**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/1682779757858817>

### **Arturo Forner Cordero**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/5540432863582207>

Relatório da bolsa PIBIC 2019-2295

**RESUMO:** O aprendizado de controle é de extrema importância para o desenvolvimento do estudante de engenharia. Em tal observância, o Laboratório de Biomecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desenvolveu, uma Interface háptica. Contudo, tal interface mostra-se insuficiente tanto para o ensino de controle quanto para os testes motores aos quais esse se propunha. A partir dessa perspectiva, é o presente projetar e construir uma nova interface háptica, capaz de se destacar como instrumento didático e realizar testes simples de controle motor.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Haptic Paddle; Teste Controle Motor; Ensino de Controle; Interface Háptica.*

**ABSTRACT:** The learning of control is extremely

important to develop an engineering student. In this sense the Laboratory of Biomechatronic of the University of Sao Paulo developed a haptic interface. However, this interface is insufficient both for teaching control and motor control tests. From that perspective, this project aims to project and construct a new haptic interface that will be able to be an didactic instrument, as well as an equipment for motor control tests.

**KEYWORDS:** Haptic Paddle; Motor Control Test, Control Teaching, Haptic Interface.

## 1 | INTRODUÇÃO

### 1.1 Objetivo do Relatório

O presente relatório tem como objetivo demonstrar os resultados produzidos pelo projeto de Iniciação Científica, intitulado “Implementação de uma Interface Háptica para Testes de Controle Motor. Design e validação de uma nova interface mecânica”, executado no Laboratório de Biomecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LB-EPUSP), pelo aluno Adriano Augusto Antongiovanni.

### 1.2 A função de uma interface háptica

Conceitua-se como interface háptica aquela interface que fornece ao usuário uma sensação tátil, seja essa pela aplicação de estímulos sensoriais, como aplicação de pressões, vibrações ou mesmo texturas.

Ressalta-se a existência de uma interface

desenvolvida para o Laboratório de Biomecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LB-EPUSP). Esta interface dispõe de joystick com um grau de liberdade constituído de um motor, um controlador implementado com Arduino e sensores de ângulo e força concatenando em uma forma de interface humano-máquina. Essa interação se dá pela aplicação de uma força contrária ao movimento de um usuário.

Nesse sentido, há uma gama de aplicações bastante relevantes, das quais serve-se como foco deste presente projeto, o aprendizado de controle motor por alunos de Mecatrônica e testes simples de controle motor

### **1.3 A interface háptica no ensino de controle**

É de extrema importância para estudantes de engenharia o contato com sistemas físicos reais para a aplicação de conceitos vistos no meio acadêmico, em sua maioria conceitos adquiridos em sala de aula. Some-se a tal o fato de o campo de estudos da interação humano-máquina estar em constante crescimento nos últimos anos, gerando cada vez mais demanda de estudantes capacitados, que possuam experiência com este tema (ULQARNAIN et al, 2017).

Nesse contexto, o *Haptic Paddle* insere-se como uma ferramenta barata, que utiliza materiais de fácil aplicação e que é capaz de abordar temas como: sistemas dinâmicos, teoria de controle, hardware de tempo real e programação gráfica (ROSE et al, 2014).

### **1.4 A interface háptica aplicada em testes de controle motor**

É importante ressaltar que pacientes sob terapia de reabilitação têm como parte de sua recuperação a retomada do controle motor de suas áreas lesionadas. Contudo, poucos são os dispositivos com parâmetros objetivos para determinar o progresso nessa recuperação. Diante disso, muitos pacientes acabam por utilizar um reduzido número de equipamentos, com acesso limitado, ou ter uma avaliação objetiva insuficiente de seu processo de recuperação (MOURA, R.T., 2016). Frente a isso, diversas linhas de pesquisa do LB-EPUSP lidam com a recuperação de pacientes, a fim de abrandar o processo de regeneração e melhoria destes.

Sendo assim, uma interface háptica é capaz de realizar testes de controle motor simples, aplicação de forças contrárias ao movimento do paciente para observar sua força ou mesmo como o organismo reage a um aparelho que possui tendência de retorno à um fixo referencial (TREBBI, A., 2017). Dessa maneira, o desenvolvimento do *Haptic Paddle* poderá contribuir para aplicação de testes de controle motor no LB-EPUSP.

### **1.5 A interface háptica em testes de efeito da privação de sono sobre o controle motor**

É importante salientar que outra linha de pesquisa do laboratório, em que testes de controle motor se fazem presentes, é traçada para analisar os efeitos do sono para o organismo. É sabido que a falta de sono afeta o desempenho motor de pessoas (FORNER-CORDERO, A et al, 2017), nesse sentido, uma interface háptica pode fornecer uma medida

de desempenho mais relevante para avaliar a qualidade do sono dos estudos atualmente em andamento (FORNER-CORDERO, A et al, 2018).

## 2 | OBJETIVOS

O objetivo do projeto é a construção de uma interface háptica que atue um instrumento de ensino em Mecatrônica conforme descrito no item 1.3, como ferramenta para testes de controle motor para o LB-EPUSP conforme descrito no item 1.4 e como ferramenta para análise dos efeitos de privação de sono conforme descrito no item 1.5. Dada a complexidade de fatores envolvidas nesse projeto, propôs-se as seguintes etapas:

- a) Análise da interface háptica do laboratório visando os aspectos mecânicos, eletrônicos e os objetivos que procurava atingir;
- b) Determinação de parâmetros que a nova interface háptica deve cumprir;
- c) Projeto e simulação de esforços da nova interface háptica;
- d) Construção de um protótipo de nova interface háptica;
- e) Comparação mecânica do protótipo com a interface antiga;
- f) Projeto e construção de uma versão final de nova interface háptica;
- h) Elaboração de teste de controle motor;
- i) Aplicação do teste;
- j) Análise dos resultados.

### 2.1 Efeitos da Pandemia na conclusão dos Objetivos

Devido ao advento do fechamento ou restrições de acesso de dos laboratórios de prototipagem da EPUSP devido a pandemia a execução plena dos objetivos foi comprometida. Esse comprometimento deu-se em atraso de fabricação dos componentes impossibilitando a montagem final do dispositivo, especificamente nos itens d) e f). Ainda assim, à partir do momento que entendeu-se que a persistência da situação de isolamento se daria ao menos por toda duração do projeto, o presente propôs-se em avançar em análises mecânicas e eletrônicas, fazendo mais simulações mecânicas que o proposto e introduzindo simulação eletrônica, ainda que o aluno não tivesse conhecimento prévio dos temas. Essas simulações adicionais tiveram como objetivo garantir uma maior confiabilidade do aparato uma vez esse fabricado.

Com essas simulações, somado a dificuldade de realizar a fabricação nos laboratórios de prototipagem da EPUSP, decidiu-se por suprimir a etapa d), correspondente a construção de um protótipo pois avaliou-se que não haveria possibilidade de executá-la, mas substituiu-se ela por novas simulações estruturais e eletrônicas.

Assim, até o presente momento, foram concluídas integralmente as seguintes etapas previamente estipuladas:

- a) Análise da interface háptica do laboratório visando os aspectos mecânicos, eletrônicos e os objetivos que procurava atingir;
- b) Determinação de parâmetros que a nova interface háptica deve cumprir;
- c) Projeto e simulação de esforços da nova interface háptica;
- e) Comparação Mecânica do protótipo com interface antiga. (feita em ambiente virtual);
- f) Projeto e construção de uma versão final de nova interface háptica.

Além dessas, a etapa de d), como dito anteriormente, foi substituída por novas análises mecânicas de conjunto e análise eletrônica da célula de carga a fim de contornar os atrasos de fabricação provocados pelas medidas de isolamento social da pandemia

Por fim, as etapas h), i) e j) não foram realizadas. A possibilidade de se realizar testes foi cortada tanto devido a impossibilidade de testar o dispositivo fabricado quanto pela necessidade de que, para realizar testes, seria necessário promover o deslocamento de pessoas, o que não é viável na situação de pandemia.

## **3 | METODOLOGIA DE TRABALHO**

### **3.1 Análise da Interface Háptica do Laboratório**

Foram analisados aspectos como a consistência mecânica do projeto e o desempenho em testes. A partir destas análises, foram levantados alguns pontos a serem melhorados, como as cargas que a estrutura suporta, o torque do motor e a precisão na aquisição de dados.

### **3.2 Determinação dos parâmetros para nova interface háptica**

Nessa etapa foram determinados quais testes a interface estará habilitada a responder e quais conceitos ela deverá ilustrar. Determina-se assim quais os requisitos de estrutura mecânica, qual o requisito de motor para atender aos esforços solicitantes e quais os requisitos de sensoriamento tanto em taxa de aquisição quanto na resolução deles.

### **3.3 Elaboração de nova interface háptica**

Dados os requisitos avaliados anteriormente, foi elaborado um novo projeto para atendê-los. Primeiramente foi feito um modelo estrutural em *Computer Aided Design* (CAD). Foi desenvolvido aqui todos os elementos estruturais para o Haptic, as disposições de sensores e atuadores e a relação entre partes móveis e fixas no projeto. Os componentes estruturais principais, bem como a célula de carga foram fabricados. Além disso, a célula de carga também foi instrumentada.

Uma vez projetado, alguns componentes críticos foram simulados individualmente quanto a ordem de magnitude de seus esforços, bem como foi feita uma simulação de

esforços no conjunto do sistema. Além disso, foi adicionado aqui uma etapa de simulação eletrônica do circuito de funcionamento da célula de carga projetada, para garantir maior confiabilidade quando essa puder ser instrumentada. A montagem do conjunto não foi possível pelos motivos expostos acima.

## 4 | RESULTADOS

### 4.1 Análise da Interface Háptica do Laboratório

A análise da Interface Háptica do Laboratório deu-se em contato com o ex-aluno de intercâmbio Alessio Trebbi, da Universidade de Twente, que construiu a interface como parte de sua conclusão de curso.

#### 4.1.1 Análise do Motor

A análise do motor teve como intuito promover um maior entendimento sobre as características e capacidades do motor utilizado. Assim, buscou-se determinar parâmetros como a resistência de armadura e a velocidade angular, para conseguir definir de forma mais precisa as características essenciais do motor da nova interface háptica.

Essa análise teve de se dar de forma experimental por meio de testes de caracterização do motor, uma vez que o motor não estava identificado e, portanto, não tínhamos acesso ao *datasheet* desse.

Para descobrir a resistência de armadura de armadura  $R$  do motor utilizou-se um multímetro, chegando na resistência de  $2.176 \Omega$ . Em seguida, realizou-se o seguinte experimento: o eixo do motor foi preso a um peso de massa conhecida muito maior do que o motor é capaz de movimentar, e realizaram-se medidas da tensão de armadura e da corrente de armadura que circula no motor nessa situação; repetiram-se as medições com um novo peso de massa conhecida e diferente do anterior, chegando-se na constante do motor  $K_m = 0.027 \text{ V}/(\text{rad/s})$ .

$$u = K_m \cdot w + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i \quad (\text{i})$$

$$K_m \cdot i = J \cdot \frac{dw}{dt} + B \cdot w - Ml \quad (\text{ii})$$

Por fim, utilizou-se as equações (i) e (ii) acima (Okamura et al, 2002), que modelam o comportamento de um motor de corrente contínua, para determinar, sob tensão nominal, a velocidade angular  $w = 364.882 \text{ rad/s} = 3486.37 \text{ RPM}$ .

Por fim, uma característica negativa do motor é que ele não possuía encoder, o que torna sua instrumentação bem mais difícil e imprecisa.

#### 4.1.2 Análise do Estrutural

A análise estrutural do *Haptic Paddle* foi realizada com intuito de dimensionar as forças as quais esta interface pode ser submetida, o quão ergonômico demonstra ser o aparelho, se os mancais de fixação dos motores estão adequados e qual o ganho mecânico de suas engrenagens. Além desses fatores, foi analisada a eficiência na disposição dos componentes desse aparelho.

Tanto o dimensionamento das forças máximas as quais o *haptic* pode ser submetido quanto o ganho mecânico das engrenagens foram analisados a partir do CAD do sistema, feito no software Fusion 360. No que diz respeito ao dimensionamento de forças que a estrutura resiste, foi aplicada ao CAD um método de simulação de elementos finitos já integrado no software do CAD. Uma vez declarado o material do *Haptic Paddle*, aplicou-se forças cada vez maiores na simulação até que houvesse uma indicação de que a estrutura não suportaria mais os esforços aplicados. As Figuras 1 e 2 mostram a simulação de esforços na qual aconteceu a condição de ruptura, que se deu com a aplicação de uma força de 48N, tendo como base o fator de segurança da peça em questão.

Quanto ao ganho mecânico das engrenagens, a vantagem de utilizar o CAD deu-se através da facilidade na contagem de dentes da engrenagem. A partir dessa contagem, chegou-se em um ganho mecânico de 6.8.

O método utilizado para os mancais de fixação dos motores, para ergonomia e para a disposição das peças foi a observação do *Haptic Paddle* construído, apresentado na Figura 3.

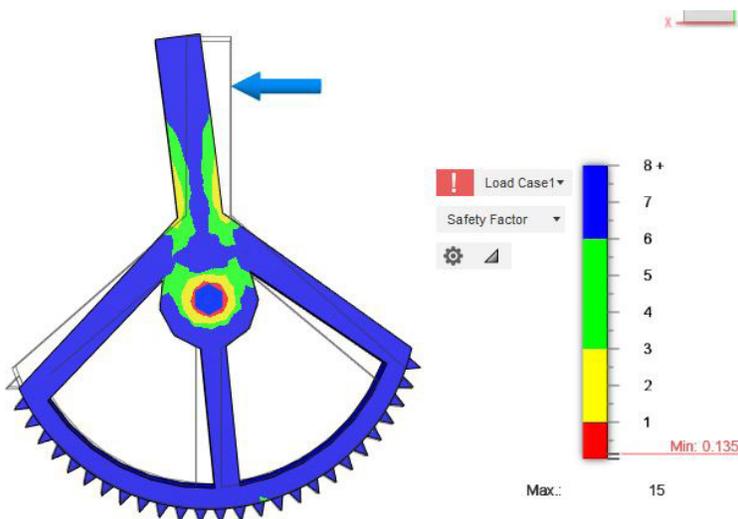


Figura 1: Esforços Gerais resultantes de uma força de 48N aplicada do Padle.

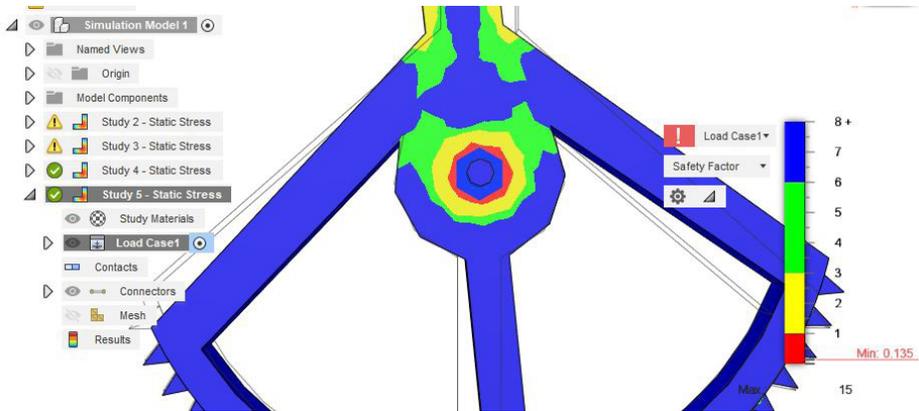


Figura 2: Foco no ponto de ruptura do Paddle com força aplicada de 48N.

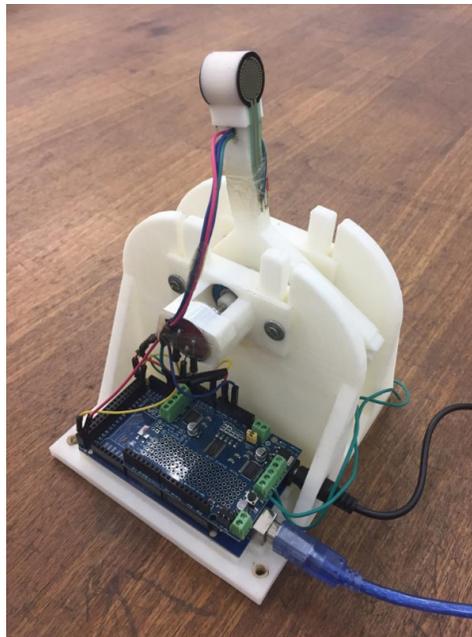


Figura 3: Haptic Paddle construído por Alessio Trebbi

Nos mancais de fixação dos motores foram realizados testes no sentido de observar como esse se comporta com vibrações e também para determinar a folga que esse permitia no movimento do motor. Percebeu-se que os mancais de fixação dos motores estavam frouxos, permitindo movimento transversal e vertical do motor e dos rolamentos de apoio.

No quesito ergonomia, analisou-se o quão confortável é operar a interface háptica, em termos de como ela responde à aplicação da força e como se dá o encaixe da mão para operá-la. O modelo se mostrou não ergonômico para os testes aplicados, principalmente

porque deve ser operado com os dedos e não haver espaço específico para eles. Além disso, uma operação utilizando toda a mão, mais própria para os objetivos da nova interface a ser projetada mostrou-se ineficiente.

Por fim, a movimentação angular dada pelo acoplamento das engrenagens com o sistema de movimento mostrou-se satisfatória.

#### 4.1.3 Análise Eletrônica

A análise eletrônica deu-se observando os componentes eletrônicos presentes na antiga interface e já pensando em possíveis modelos para a nova interface. Dito isso, o Arduino Mega e os drivers de motor empregados na interface háptica já presente no laboratório são satisfatórios para qualquer uma das configurações eletrônicas pensadas.

Contudo, dois sensores empregados serão substituídos. Para contornar o fato já mencionado que o motor empregado não apresentava encoder, utilizou-se um potenciômetro para obter a posição angular, o que apresentava leituras imprecisas além de dificultar o manuseio do aparelho por conta de conexões elétricas. Além disso, utilizou-se sensores de pressão para determinar a força que um usuário estava exercendo no sistema. Esses sensores, além de também fornecerem leituras imprecisas e dificultarem o manuseio do aparelho, também obtinha a força aplicada de uma forma indireta.

## 4.2 Premissas de Projeto da nova Interface Háptica

Após a análise da interface háptica do laboratório, procurou-se na literatura diversas referências para aprimoramento desse aparato. A principal delas foi o “*The Rice Friction Drive Haptic Paddle*” (ROSE et al, 2014), desenvolvido pela *Rice University* como uma ferramenta de baixo custo para ensino de controle e de experimentos em ambiente virtual. No aspecto mecânico, que era o foco dessa revisão bibliográfica, essa interface se assemelha muito com a desenvolvida por Alessio Trebbi, com a diferença de que a transmissão de movimento é feita por fricção ao invés de por uma engrenagem. Esse padrão é repetido em diversos outros trabalhos e universidades como no “*Haptik 3.0*” (MARTINEZ et al, 2019) desenvolvido pela universidade pela *Stanford University*.

Em todas essas interfaces comentadas, o foco é unicamente o aprendizado. Até por esse motivo, houve pouca preocupação com a operação do aparelho, sendo que todos esses são pensados para serem manipulados com os dedos, mas mesmo assim não tem espaço específico para esses. Dessa forma, como adiciona-se o objetivo de que o Haptic Padle proposto possa ser também utilizado para testes de controle motor, uma das mudanças fundamentais para todos esses modelos propostos é que a operação do aparelho será feita não com os dedos, mas sim com as mãos, com uma peça específica projetada para isso.

Outra necessidade de adaptação é a aquisição de dados de força pelo usuário. Como já dito, a aquisição é feita por sensores de pressão e isso traz uma série de complicações

para uma aquisição precisa, necessária tanto para um aprendizado melhor como para aplicação em testes de controle motor. Sendo assim, optou-se por utilizar extensômetros acoplados a uma célula de carga para fazer a aquisição direta da força aplicada pelo usuário. As vantagens de se utilizar uma célula de carga são tanto na precisão da medida da força quanto no fato de que, como poderá ser visto melhor adiante, a própria célula de carga está adaptada para ser uma peça ergonômica para a mão de um usuário, resolvendo assim o problema de interface com o usuário e a aquisição de dados em uma única peça.

Já as partes móveis do Haptic Padle devem estar adaptadas para o movimento humano, sobretudo a capacidade do motor escolhido. Para traduzir o movimento humano em critérios de escolha de motor, realizaram-se dois testes, uma para medir a força aplicada por uma pessoa saudável na interface háptica presente do laboratório, e outra para medir a velocidade angular que essa pessoa consegue exercer. O teste de força aplicada foi feito considerando-se que a pessoa deveria ser capaz de sentir uma força contrária ao seu movimento aplicado pelo antebraço, e, portanto, estar realizando esforço em seu movimento. O valor medido para essa força foi de 100N. Já a velocidade angular foi medida com a instrumentação da interface háptica descrita presente no laboratório, chegando-se à medida de que essa deve ser entre 17 e 20 rotações por minuto. Ainda nesse quesito, observou-se que o uso de engrenagens ou fricção para transmissão do movimento produzida por partes componentes do aparelho são fatores dificultadores de projeto e motivos de grandes perdas mecânicas. Sendo assim, optou-se por não utilizar esses meios para transmissão de movimento, e sim um cubo de roda também projetado especificamente para esse aparelho.

Por fim, os elementos estruturais também devem ser adaptados. Como mostraram as Figuras 1 e 2, a interface háptica presente no laboratório só resiste a forças aplicadas de até 48N, sendo que é necessário aguentar 100N para efetuar testes de controle motor. Ressalta-se, portanto, a necessidade de uma estrutura mais robusta.

### **4.3 Projeto, simulação de esforços e construção de uma nova Interface Háptica**

O primeiro componente projetado para a adaptação do *Haptic Padle* foi a célula de carga, uma vez que essa é a interface com o usuário e, portanto, foi escolhida para parametrizar a escolha e projeto de todos os demais componentes.

A célula de carga teve seu *design* baseado em um projeto já desenvolvido anteriormente no laboratório, uma vez que o sentido de aplicação de força seria parecido ao desse projeto, levando a uma arquitetura de aquisição análoga. Além disso, o projeto foi adaptado para atender aos requisitos de força expressos acima. Outro fator importante para seu projeto é o de que a célula de carga fosse ergonômica para o manuseio com agarre pela mão e com apoio do antebraço em superfície reta e sólida, então determinou-se que ela tivesse um comprimento de 20cm à partir do seu centro de rotação para um

manuseio adequado.

Estando projetada, uma primeira validação desse projeto foi realizada por um especialista em células de carga da Escola Politécnica, o Dr João Alcino, que atestou a aplicabilidade da célula de carga para o caso desejado para até 300N de força, com uma resolução de 1N, o que atende a força máxima aplicada de 100N e tem resolução suficiente para o propósito do aparato. Nessa avaliação, também se chegou à conclusão que o melhor material para a célula de carga seria o alumínio.

Em seguida, realizou-se uma simulação estrutural de análise de elementos finitos dessa célula de carga, para averiguar a deformação simulada da célula, o que gerou o perfil representado na Figura 4. Por meio dessa análise, foi possível determinar que as deformações sofridas pelo movimento seriam de fato detectáveis pelos extensômetros na resolução desejada.

Sendo assim, foi aprovada a fabricação dessa peça. Inicialmente pretendia-se usar as máquinas CNC da Escola Politécnica. Contudo, após passar alguns meses na fila para ser fabricada, decidiu-se por uma usinagem externa utilizando fresas. A célula de carga fabricada pode ser observada na Figura 5.

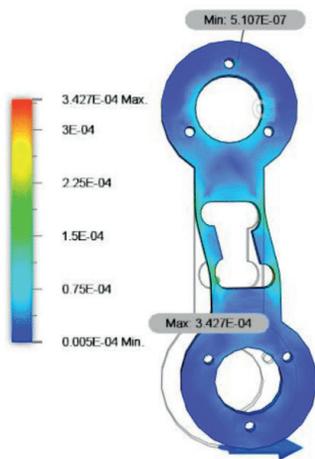


Figura 4: Simulação célula de carga



Figura 5: Célula de Carga Fabricada

Com a célula de carga fabricada, agora seria necessário desenhar seu circuito de instrumentação. Inicialmente, essa etapa seria desenvolvida no laboratório, mas devido ao advento das restrições de acesso, isso não foi possível.

Dessa maneira, o aluno adiantou-se em nos estudos, estudando a matéria de Eletrônica Analógica que ainda não havia cursado, para poder projetar o circuito de instrumentação da célula de carga. Essa etapa foi adicionada também para dar mais

robustez ao projeto e, com a situação de acesso aos laboratórios normalizada, poder fabricar com mais confiabilidade os componentes que restam do Haptic Padle.

Primeiramente, para desenvolver esse circuito, como o aluno não tinha conhecimento dessa matéria, o professor Arturo, que orienta esse trabalho e também ministra a disciplina de Eletrônica Analógica na Escola Politécnica, deu o embasamento teórico para o aluno. Esse, somado a orientação do Sr. João Alcino quanto a instrumentação da célula de carga, possibilitaram a modelagem do circuito.

A Figura 6 representa o circuito mencionado acima em ambiente virtual. Para construção desse circuito utilizou-se o programa MPLAB Mindi 8.20. Esse programa tem circuitos integrados apenas na empresa Microchip.

O aluno já havia selecionado, com o auxílio do aluno de mestrado Victor P. Bartolomeu, e comprado os circuitos integrados LM3900N da Texas Instruments, que são amplificadores operacionais quádruplos, ou seja, integram 4 amplificadores operacionais em um mesmo circuito integrado. Essa escolha foi feita pois, ao integrar esses em um mesmo circuito, diminui-se ruído na amplificação dos sinais da célula de carga, o que é muito importante pois as variações de voltagem fornecidas pela célula de carga são muito pequenas.

Contudo, como o programa de simulação escolhido tem apenas circuitos integrados da Microchip e não tem embarcado nenhum amplificador operacional quádruplo, optou-se por projetar o sistema com quatro amplificadores operacionais equivalentes, tendo o aluno escolhido o amplificador operacional equivalente MCP6031. Isso não apresenta problemas para a posterior construção uma vez que há equivalência entre os dois circuitos e, mesmo o LM3900N sendo um amplificador operacional quádruplo, ainda seria necessário representar suas entradas e saídas de sinal em cada amplificador operacional implementado dentro dele, o que é equivalente as conexões da Figura 6.

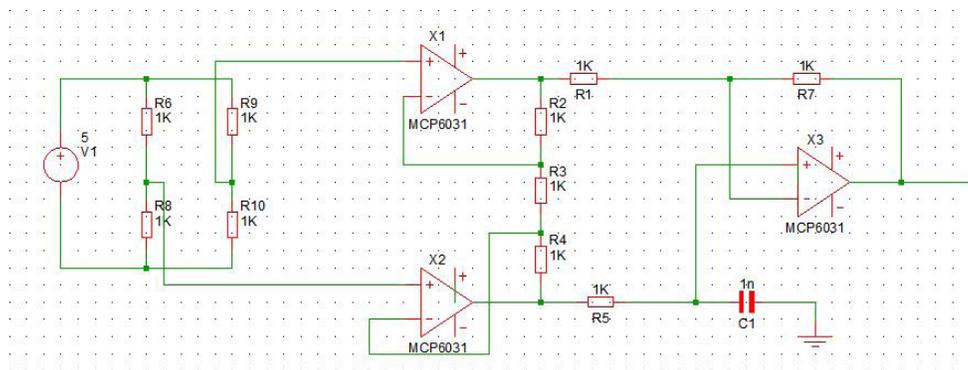


Figura 6: Circuito de instrumentação da célula de carga

A ponte de Wheatstone está presente nesse circuito pois é esse o arranjo que os extensômetros farão na célula de carga. Os quatro extensômetros estão representados pelas resistências R6, R9, R8 e R10 e a fonte de alimentação desse circuito está representada por V1. O sinal captado pelo arranjo de extensômetros acima está conectado diretamente a entrada positiva de dois amplificadores operacionais, X1 e X2, com realimentação negativa regulada pelas resistências R2, R3 e R4. O sinal do amplificador X2 é direcionado a entrada positiva de X3, regulado pela resistência R5. Já o sinal de X1 é direcionado para a entrada negativa de X3, junto com a realimentação negativa desse amplificador. A resistência R1 regula a alimentação vinda de X1 e a resistência R7 regula a realimentação negativa e X3. O capacitor C1, conectado ao terra do circuito, tem como objetivo realizar uma filtragem de ruídos no sinal desse.

Com o circuito apresentado acima, a implementação da célula de carga se torna mais confiável na medida que os componentes necessários bem como os seus dimensionamentos já estão feitos, de tal maneira que se agiliza e torna mais seguro a elaboração do circuito de instrumentação da célula de carga.

Para finalizar a célula de carga, devido ao começo da normalização do acesso aos laboratórios, o aluno conseguiu realizar a colagem dos extensômetros na célula de carga. Os extensômetros utilizados foram os de modelo 3/350 LY11 da marca HBM, que tem resistência de  $350 \Omega \pm 0.35\%$  e fator Gage de  $1.99 \pm 1.0\%$  e é adequado para aplicações em alumínio, material utilizado na fabricação da célula de carga. Para a colagem, utilizou-se o auxílio do material das aulas de mestrado da EPUSP de instrumentação (DRIEMEIER et al, 2018), da qual se utilizou o passo-a-passo para essa colagem ali presente. Esse procedimento é: Lixar a superfície na qual os extensômetros serão posicionados, com cuidado para não gerar fissuras (Imagem 7); tratar superficialmente com produto químico adequado, no caso utilizou-se acetona, para remoção das sujeiras do processo anterior e gordura (Imagem 8), posicionamento do extensômetro com o auxílio de fitas adesivas com pouca cola para orientar sua posição e de uma pinça para manusear o extensômetro (Imagem 9); aplicação de cola especial fornecida pelo fabricante dos extensômetros para que a dilatação dessa seja semelhante a do extensômetro e do alumínio, para gerar maior confiabilidade de leitura (Imagem 10). Essa cola pode ser vista ao fundo da imagem 9. Por fim, a Imagem 10 mostra a os extensômetros colados de um dos lados da célula de carga, e a Imagem 11 mostra como ficou à disposição após a colagem de todos.

Uma vez concluída a célula de carga, a próxima etapa foi, a partir das medidas dela, determinar um motor adequado para atender aos requisitos de força e rotação requeridos, além do torque necessário para o motor. Dessa forma, dada a célula de carga como um braço de 20cm e a força aplicada pela pessoa sendo no máximo de 100N, determinou-se que um motor com torque de 3KgfcM seria o suficiente para gerar uma força contrária ao movimento que pudesse ser sentida pelo usuário, sem machuca-lo ou danificar o aparelho.



Imagem 7: Célula de Carga e Lixa.



Imagem 8: Tratamento químico célula de carga.

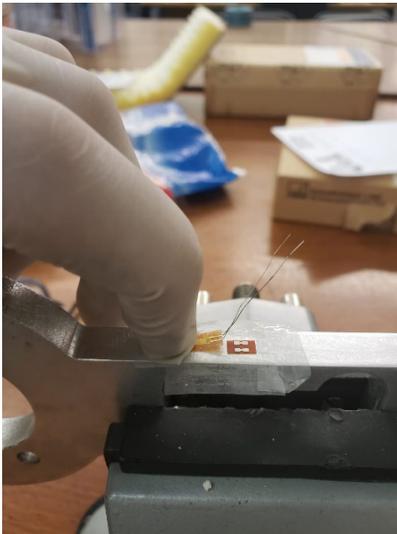


Imagem9: Posicionamento Extensômetro.

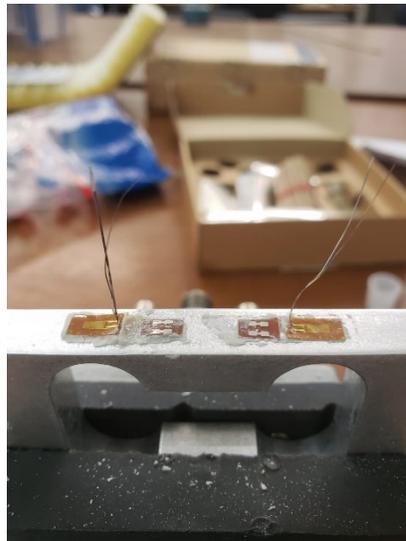


Imagem10: Colagem dos Extensômetros.



Imagem11: Disposição final dos extensômetros na célula de carga.

Sendo assim, ficou claro que o motor empregado no Haptic Paddle do laboratório não cumpriria os requisitos necessários por três motivos principais: ele não possuiu encoder, ele precisa de uma redução por um sistema de engrenagens para ampliar o torque transmitido e seu torque é muito baixo. Sendo assim, tornou-se requisito para o novo motor ter um encoder, ter uma caixa de redução interna e ter torque compatível com o requisitado

Portanto, escolheu-se o **“Motor metálico 75:1 25Dx54L mm com encoder”** (MOT0051102) que se adequa aos requisitos levantados acima e também possui um *encoder*. O motor escolhido pode ser observado na Figura 12, onde observa-se na parte esquerda da imagem a caixa de engrenagens e na ponta direita do motor o *encoder*.



Figura 12: Motor escolhido.



Figura 13: Cubo de Roda Fabricado.

Outra peça fabricada foi o cubo de roda Figura 13, fabricado em alumínio. A célula de carga é projetada de forma a entrar pelo cilindro que pode ser observado na parte direita da figura até alinhar-se com os furos do disco mais externo dessa peça e ser presa com parafuso e porcas a ela. Na outra ponta, conecta-se o motor, com o eixo desse entrando no buraco que pode ser visto do lado direito da imagem. Dessa forma, o movimento do motor é transferido para o cubo de roda e, portanto, para a célula de carga acoplada a esse. Para que o peso da parte direita do cubo de roda não faça a estrutura pender para baixo, apoia-se ainda o cubo de roda em dois rolamentos, que, tal como a célula de carga, entram pelo eixo visualizado no lado esquerdo.

Os rolamentos escolhidos para esse acoplamento foram os *NSK 6804 zz*, com os critérios de: Tem vedação com contato, o que é importante para garantir seu funcionamento correto mesmo com esses suportando patê do peso do aparelho; Tem diâmetro interno adequado para acoplagem com o cubo de roda; Tem garantia de operação calculada à partir do catalogo e com os dados de aplicação de força acima para mais de 10.000 ciclos de trabalho, suficientes para um ciclo de vida de testes de controle motor e ensino de controle.

Por fim, para apoiar os rolamentos e motor, e evitar os problemas de uma fixação frouxa observados no Haptic anterior, foram produzidos em MDF 6mm com o método de corte a Laser, o que garante precisão e, portanto, um encaixe justo dessas peças. Esses apoios cortados a laser podem ser observados na Figura 14. Observa-se que há duas peças diferentes, uma justamente para os rolamentos e outra para o motor. Esses apoios, estão presos a uma placa de madeira por meio de cantoneiras, conferindo ao sistema ainda mais estabilidade devida a grande superfície para distribuição de peso que essa placa tem.



Figura 14: Bases de rolamento e motor.



Figura 15: CAD de conjunto do *HapticPaddle*.

Por fim, todos os componentes descritos acima estão juntos como mostra a Figura 15. Como dito anteriormente, por problemas de acesso aos laboratórios, mesmo com as peças fabricadas, não foi possível fazer a montagem final do Haptic Padle. Por esse motivo, a imagem trazida é do CAD da montagem. Ainda assim, o tempo de montagem foi utilizado para outra atividade, que também teve como intuito dar mais embasamento ao projeto e garantir maior taxa de sucesso quando esse for construído tal como o projeto eletrônico da instrumentação a célula de carga, foi feita uma simulação de conjunto que pode ser observada na Figura 16.

Essa simulação de conjunto deu-se aplicando a força de 100N, considerando os apoios de MDF presos por cantoneiras e considerando a célula de carga presa ao cubo de roda com parafusos e porcas. Observa-se por essa imagem que o conjunto se apresenta superdimensionada para aguentar os esforços aplicados, o que é muito positivo pois, deseja-se concentrar os esforços aplicados justamente na estrutura da célula de carga, para que essa possa ter uma leitura mais precisa. Dessa maneira, não só a estrutura é suficiente para aguentar os esforços aplicados, como é ideal mecanicamente para facilitar a tomada de dados pela célula de carga.

A simulação foi feita para medir o deslocamento total, e foi feita dessa maneira por dois motivos principais. O primeiro é para observar o deslocamento da célula de carga, que como já averiguado, é suficiente. O segundo é para verificar o deslocamento de cada componente do conjunto. Como pode observar-se, apenas a célula de carga se mexe, o que indica que as fixações de rolamento, motor e de célula de carga foram exitosas.

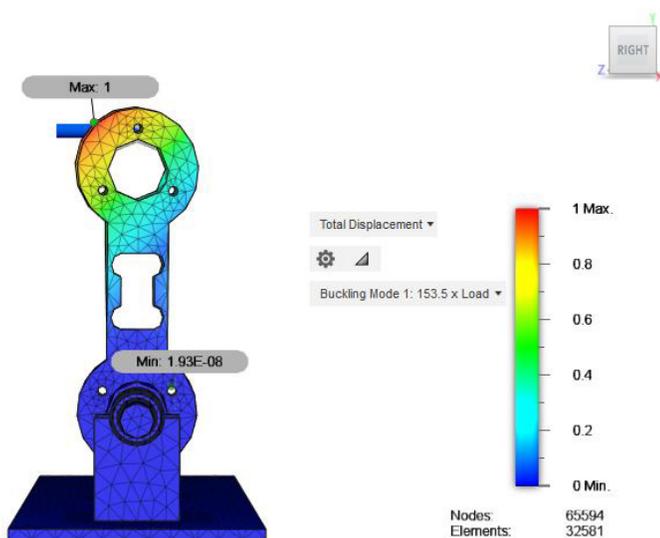


Imagem 16: Simulação de esforços sob conjunto.

## 51 CONCLUSÃO

A construção de uma nova interface háptica mostrou-se um trabalho multifacetado, com diversas nuances e bastante complexo. A começar com uma extensa análise de projeto desenvolvidos dentro e fora do laboratório, analise essa muito importante para entender como esse instrumento está sendo utilizado por diversas instituições, e em quais premissas ele se baseia. Com certeza adicionar testes de controle motor como um objetivo, além do ensino, uso comum desse dispositivo, foi também adicionar maior grau de complexidade nesse projeto, primeiro pela falta de referências diretas nesse ramo, segundo pela necessidade de preocupação com questões como ergonomia, que outros projetos não tem de se preocupar.

Para além dessa etapa de pesquisa e definição de premissas para a nova interface, houve ainda um desafio para o desenvolvido de um projeto completo, desde sua concepção, passando por sua simulação até sua fabricação. A parte de concepção da interface foi a etapa com a qual o aluno tinha mais familiaridade, tendo sido uma das partes mais rápidas. É claro que, antecedente a ela, houve grande discussão no laboratório para definir os parâmetros necessários para o projeto da nova interface, mas uma vez que essa discussão se transformou em dados experimentais concretos, bastou-se executar os requisitos de projeto. A parte de simulação foi a de mais aprendizados, uma vez que o aluno não estava familiarizado com softwares para fazê-las e nem tinha conhecimento de como executá-las com eficiência. Mesmo assim, obteve muita ajuda de colegas e membros do laboratório. Por fim a fabricação da interface háptica mostrou-se, aquém das expectativas, uma das etapas mais desafiadoras. Isso se deve ao fato de em muitos momentos o aluno ter dependido de estruturas de fabricação internas da universidade, que não corresponderam com o prazo desejado. Ainda assim, todos esses percalços, sejam de conhecimento, sejam de organização de projeto, foram superados para produção de cada uma das peças necessárias para fazer a interface háptica projetada.

Infelizmente numa etapa de conclusão do projeto, o mundo foi acometido com uma pandemia, que para efeitos desse projeto, restringiu o acesso a diversos laboratórios, impossibilitando a montagem final da interface háptica. Mesmo assim, incrementou-se ao projeto novas simulações, aumentando ainda mais o conhecimento do aluno nesse aspecto. Ressalta-se aqui a simulação de esforços de conjunto da interface háptica, que se mostrou muito consistente com os resultados esperados e incentivam o aluno ainda mais a montar o sistema completo. Além desse, montou-se o circuito de instrumentação da célula de carga, apesar de o aluno não ter conhecimento prévio da matéria envolvendo esse até pouco tempo antes da entrega do relatório, o que é um passo muito importante para garantir segurança na posterior montagem física desse circuito.

Dessa maneira, a experiência proporcionada por esse projeto foi de enorme valia para o aprendizado do aluno em aspectos de concepção de projeto, simulação, fabricação

e dimensionamento eletrônico de um aparelho. Além disso, o projeto com certeza contribuiu para o laboratório ao planejar e fabricar todas as peças para uma nova interface háptica.

Sendo assim, mesmo envolvido em um projeto muito complexo por todos os motivos abordados acima e tendo sido impactado diretamente pelas restrições de acesso aos laboratórios devido a pandemia, o projeto prosseguiu, concluindo suas etapas de fabricação e adicionando mais etapas teóricas de simulação e projeto. As etapas de montagem final da nova interface háptica e de instrumentação da célula de carga poderão, agora com a sinalização de uma vota das atividades de laboratório, ser concluídas muito em breve.

## AGRADECIMENTOS

Pelas contribuições nesse projeto em tempo dedicado, ideias e discussões, gostaria de agradecer ao meu orientador Arturo Forner Cordero por indicar caminhos de pesquisa não percebidos pelo aluno, ao intercambista Alessio Trebbi por ter explicado o processo para fabricação de sua interface háptica e ao aluno de mestrado Pedro Parik, por ter explicado diversos conceitos necessários para o desenvolvimento da iniciação científica, mas cujos conteúdos o aluno ainda não havia tido em sua graduação.

## REFERÊNCIAS

1. FORNER-CORDERO, A; QUADRADO, V.H. ; TSAGBEY, S. A. ; SMITS-ENGELSMAN, B. 2018a. Improved Learning a Coincident Timing Task With a Predictable Resisting Force. *MOTOR CONTROL*, v. 22, p. 117-133, 2018.
2. FORNER-CORDERO, A; UMEMURA, G.S.; FURTADO, F. ; GONCALVES, B. S. B. 2018b . Comparison of sleep quality assessed by actigraphy and questionnaires to healthy subjects. *Sleep Science (Online)*, v. 11, p. 141-145, 2018.
3. MOURA, R.T.; SOUZA, R.S. ; GARCIA, E. ; QUADRADO, V.H. ; VILLALPANDO, M.B. ; FORNER-CORDERO, A. 2016. Exoskeleton application to assist learning of a coincident timing motor task of the arm using passive mechanical perturbations. In: 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2016, Singapore. 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). p. 984.
4. ROSE, Chad G. ; FRENCH, James A.; O'MALLEY, Marcia K.. *In: 2014 IEEE HAPTICS SYMPOSIUM (HAPTICS)*, 2014, Houston, TX, USA. Design and characterization of a haptic paddle for dynamics education [...]. Rice University, USA: [s. n.], 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6775465/authors#authors>. Acesso em: 25 abr. 2019.
5. TADIELLO, Carlo *et al.* *In: 2016 EUROPEAN CONTROL CONFERENCE (ECC)*, 2017, Aalborg, Denmark. Teaching physical human-robot interaction to computer science undergraduate students [...]. Department of Computer Science, University of Verona, Italy: [s. n.], 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7810314/authors#authors>. Acesso em: 15 abr. 2019.
6. TREBBI, Alessio. Design of a haptic paddle for education in bio-robotic systems dynamics. 2017. Relatório de Intercâmbio (Graduação) - Aluno de Intercâmbio, Universidade de São Paulo, Brasil, 2017.

7. ULQARNAIN; KOUL, Majid H.; SHAHDAD, Ibrah. In: 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE OF ROBOTICS SOCIETY OF INDIA, 2017, Nova Delhi, India. Towards an Open Source Haptic Kit to teach basic STEM concepts [...]. IUST, J&K, India: [s. n.], 2017. Disponível em: [http://delivery.acm.org/10.1145/3140000/3134914/a50-Zulqarnain.pdf?ip=143.107.98.71&id=3134914&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=344E943C9DC262BB%2E0DBCED839AA5AFE8%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&\\_\\_acm\\_\\_=1557880322\\_86b25a96084305a69fcaa3a7098269bb](http://delivery.acm.org/10.1145/3140000/3134914/a50-Zulqarnain.pdf?ip=143.107.98.71&id=3134914&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=344E943C9DC262BB%2E0DBCED839AA5AFE8%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&__acm__=1557880322_86b25a96084305a69fcaa3a7098269bb). Acesso em: 1 maio 2019.

8. UMEMURA, G.S. ; NORIEGA, C.L. ; SOARES, D.F. ; FORNER-CORDERO, A. 2017a . Biomechanical procedure to assess sleep restriction on motor control and learning. In: 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2017, Jeju Island. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2017. p. 1397. 6

9. UMEMURA, G.S. ; PINHO, J. P. UMEMURA, G.S.; PINHO, J.P.; GONCALVES, B.S.B; FURTADO, F.; FORNER-CORDERO, A. 2018. Social jetlag impairs balance control. Scientific Reports, v. 8, p. 9406, 2018.

10. UMEMURA, G.S.; PINHO, J.P.; GONCALVES, B.S.B; FURTADO, F.; FORNER-CORDERO, A. 2018. Social jetlag impairs balance control. Scientific Reports, v. 8, p. 9406, 2018.

11. OKAMURA, ALLISON M.; RICHARD, CHRISTOPHER; CUTKOSKY, MARK R. In: Journal of Engineering Education, 2002. Feeling is Believing: Using a Force-Feedback Joystick to Teach Dynamic Systems.

12. OKAMURA, ALLISON M.; IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, VOL. X, NO. X, JANUARY 2019. Evolution and Analysis of Hapkit: Na Open-Source Haptic Device for Educational Applications. Department of Mechanical Engineering, Stanford University.

13. DRIEMEIER, Larissa; ALVES, Marcilio; MOURA, R.T. Instrumentação, cap 1-3, 2018.

## BRAÇO ROBÓTICO UTILIZANDO SENSOR DE COR PARA SEPARAÇÃO DE OBJETOS

*Data de aceite: 01/03/2021*

**Airam Toscano Lobato Almeida**

Universidade Federal do Mato Grosso

**Gefté Alcantara de Almeida**

Universidade Federal do Mato Grosso

**Eduardo Garcia Medeiros**

**Douglas Pires Pereira Junior**

Universidade Federal do Mato Grosso

**Samuel Vasconcelos de Oliveira**

**Carlos Henrique Cruz Salgado**

**RESUMO:** Um dos principais pontos associados a indústria ao crescimento de produtividade é o investimento em novas tecnologias para maximizar a sua produção. Visando esse processo de maximização, foi desenvolvido na disciplina de sistemas embarcados, um protótipo utilizando um braço robótico integrado ao um sensor de cor para fazer a separação de objetos nas cores RGB. Na teoria, o protótipo se iguala a um braço robótico industrial, fazendo a operação de separação de objetos conforme programado. O sistema possui um sensor TCS 230 e 4 servos motores para a movimentação, utiliza-se um arduino uno e um braço robótico para a montagem do protótipo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Braço robótico, sensor de cor, separação de objetos.

### ROBOTIC ARM USING COLOR SENSOR FOR SEPARATION OF OBJECTS

**ABSTRACT:** One of the main points associated with the industry in productivity growth is the investment in new technologies to maximize its production. Aimed at this process of maximization, a prototype using a robotic arm integrated with a color sensor was developed in the discipline of embedded systems to make the separation of objects in RGB colors. In theory, the prototype equals an industrial robotic arm, making the object separation operation as programmed. The system has a sensor and 4 servo motors for the drive, it uses an arduino one and a robotic arm for the assembly of the prototype.

**KEYWORDS:** Robotic arm, color sensor, object separation.

### INTRODUÇÃO

Um dos principais pontos associados ao crescimento de produtividade na indústria é o investimento de novas tecnologias para maximizar a produção. De acordo com a pesquisa nacional da confederação nacional da indústria (CIN), a indústria brasileira está a cada vez mais se familiarizando com projetos e pesquisas para o avanço e descobertas de novas tecnologias. Entretanto, ainda existe muito desconhecimento sobre tecnologias em médias/pequenas empresas, em uma lista de dez opções de tecnologias, 57% delas não identificaram quais tem a maior potência para impulsionar a competitividade da indústria.[3]

Como dito anteriormente, o processo de aperfeiçoamento tecnológico que milhares de indústria encaram hoje, não vem de agora e sim de décadas passadas. No entanto, no começo do século 21, houve novas formas de interação entre a máquina e o homem, acelerando o ritmo de produtividade e de entrega da mercadoria. [1]

Para sermos mais precisos, hoje em dia, há milhares de empresas contando com um braço robótico industrial para otimizar e garantir a automação necessária para competir em um mercado que cresce a cada dia, oferecendo novos produtos (cada mais segmentos e plurais) para o consumidor final. Neste cenário favorável ao crescimento, cada vez mais em escala global, contar com um braço robótico industrial não é só uma questão de escolha, mas uma necessidade porque o braço robótico industrial será o maior investimento do setor daqui para o futuro. [1]

Se tratando de didática, foi utilizado no projeto um braço robótico de acrílico desenvolvido com o intuito de ser considerado uma ferramenta de baixo custo e grande funcionalidade, mas com o mesmo princípio de funcionamento de um braço robótico industrial. O Braço Robótico de acrílico deve ser montado junto de 4 Micro Servo Motores de 180°, responsáveis pelos movimentos executados pelo mesmo.

Para o funcionamento completo do projeto, foi integrado ao braço robótico um sensor de cor chamado tcs230, seu princípio de funcionamento se baseia em uma matriz 8x8 de fotodiodos combinados com um conversor corrente-frequência. Portanto, são 64 fotodiodos que constituem a célula principal do sensor. Desses 64, 16 possuem filtros para a luz verde, 16 para a vermelha, 16 para a luz azul e 16 não possuem filtro algum. Sob esse conjunto de fotodiodos incide a luz refletida pelos objetos posicionados ao alcance do sensor. Os fotodiodos geram uma corrente de saída de acordo com a intensidade da luz refletida e também de acordo com seus filtros. [2]

Neste artigo serão descritas as etapas de projeto referentes a seu funcionamento, programação e disposição física dos componentes de hardware que compõem o projeto.

## JUSTIFICATIVA

O projeto foi inspirado nos modelos de automação nas indústrias brasileiras, com intuito de conhecer e aperfeiçoar técnicas referentes ao braço robótico, conhecendo seu funcionamento e descobrindo novas formas de se trabalhar didaticamente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para este projeto foram desenvolvidas duas frentes de trabalho: (1) braço robótico e (2) sensor de cor tcs230 acoplado ao braço robótico. Assim sendo, as frentes foram divididas entre *hardware* e *funcionamento*. O dispositivo contém os servos motores e o sensor TCS 230, os servos motores são responsáveis pela movimentação do braço robótico, e o sensor

é responsável pela identificação dos objetos, como pode-se observar na figura 2.

## FUNCIONAMENTO

O sensor de cor TCS230 tem como funcionamento a medição de três cores primárias: vermelho, verde e azul e também possui um sensor de luz branca separado. Como qualquer cor pode ser criada a partir de diferentes níveis dessas cores primárias, a unidade pode informar a composição da cor de uma fonte de luz. Os quatro LEDs da placa breadkout (Figura 1) estão lá para iluminar o objeto com uma fonte de luz uniforme, facilitando a obtenção de uma medição de luz. O dispositivo reage ao infravermelho, portanto pode precisar de um filtro infravermelho ou usar o dispositivo em um espaço fechado.



Figura 1. Sensor TCS 230.

Em vez de dar uma saída para cada cor, o dispositivo produz um único sinal, que é uma onda quadrada. A frequência da onda quadrada é proporcional à quantidade de luz que incide sobre um conjunto de diodos detectores de luz. Como existem quatro fontes diferentes de informações: fotodiodos vermelho, verde, azul e claro, espera-se quatro saídas. Em vez disso, controla-se qual conjunto de diodos está conectado à saída usando duas entradas de controle digital. Portanto, apenas um conjunto de fotodiodos é conectado por vez para gerar a saída.

O sinal de saída do TCS230 é obtido por uma corrente para o conversor de frequência, que recebe como entrada a corrente média do conjunto selecionado de fotodiodos. A ideia é que mude um conjunto, faça uma leitura e depois mude para o próximo conjunto até que todas as quatro medições estejam concluídas. O sinal de saída é uma onda quadrada com razão de marca para espaço igual: 50% alta, 50% baixa.

A saída de frequência máxima da escala completa do TCS230 é mostrada abaixo para os fatores de escala controlados por S0 e S1. O dimensionamento é realmente apenas usando um chip de clock interno que conta o sinal de entrada (a saída do clock primário da corrente do fotodiodo para o conversor de frequência) e gera clocks divididos.

S0	S1	Max output frequency kHz	%scale
H	H	600kHz	100%
H	L	120kHz	20%
L	H	12kHz	2%
L	S1 = L	Power down	Power down

Tabela 1. Controle de escala.

S2	S3	Selected Photodiodes
L	L	Red
L	H	Blue
H	L	Clear
H	H	Green

Tabela 2. Controle de Fotodiodos.

A saída de onda quadrada do dispositivo também pode ser dividida e isso permite que os processadores mais lentos façam medições com mais facilidade. Não há penalidade de medição, pois a saída dividida é simplesmente uma média do original. A única desvantagem é que, como o sinal é de uma frequência menor, não poderá fazer medições tão rapidamente.

Se fosse importante fazer uma leitura de luz muito rápida, usaria um processador de alta velocidade e não dividiria o sinal de saída. Pode-se imaginar que isso pode se tornar importante em uma medição de processo industrial, e para medir o estado de um produto, teria que medir rapidamente a cor de um item em uma correia transportadora e rejeitá-lo se estiver na cor errada.

Para que ocorra uma leitura correta do objeto, deve-se haver um calibração do sensor. O sensor é muito sensível a quaisquer alterações na luz e, na prática, isso significa que qualquer ligeira mudança de distância do sensor para o objeto causará uma leitura diferente. Além disso, qualquer alteração de luz ambiente também causará uma leitura diferente. Então, para fazer leituras precisas (repetíveis) você precisa controlar dois elementos:

- Luz ambiente.

- Distância ao objeto.

Para o funcionamento total do projeto, Acopla-se o sensor TCS230 no braço robótico para a movimentação e separação dos objetos, utilizando um arduino uno e a plataforma arduino IDE para programação como mostrado na figura a seguir.

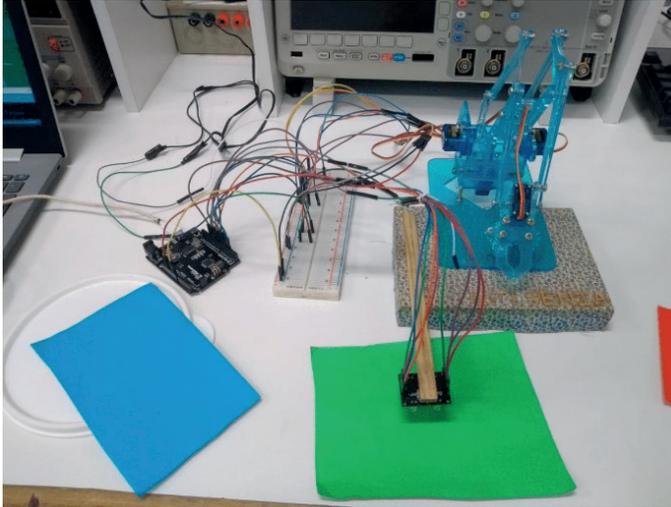


Figura 2. Braço robótico utilizando sensor de cor tcs230.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto apresentou resultados satisfatórios para componentes eletrônicos de baixo custo. O braço feito em acrílico não possui uma grande resistência e suas peças menores são muito difíceis de manuseio e se quebra facilmente, o sensor de cor TCS230 varia muito na recepção do sinal emitido, qualquer interferência o sinal seja ruído, mecânica entre outras o mesmo sofre de uma variação de centenas em sua unidade de medida de frequência.

Analisando o resultado obtido e o que se propunha, há uma conclusão de 85% do esperado. Obteve-se o mapeamento das posições de movimento com os servos motores, controle do PWM dos servos com o sensor de cor, reconhecimento das cores através de software. O sistema é apenas um protótipo básico, mas apresenta um bom desempenho.

## CONCLUSÃO

A melhor maneira de obter uma detecção de cores mais precisa, que corresponda melhor à resposta do olho humano, é usar um filtro infravermelho na frente do sensor. Observe que isso também se aplica ao TCS3210, uma vez que o sensor também empregam

fotodiodos semelhantes que possuem curvas de resposta semelhantes. No entanto, ainda pode usar os dispositivos sem um filtro IV e ainda obterá resultados de cores, desde que as condições de iluminação e a distância do objeto sejam mantidas constantes.

Os resultados obtidos no presente trabalho concluem que é possível modelar e projetar um braço robótico sem inteligência artificial que seleciona um determinado objeto apenas por sua cor, cuja a finalidade seja aplicação em classificação de objetos que apresentem semelhanças entre si. Esse projeto pode ser usado não só para cor, como tamanho, defeitos e afins. Portanto, é um recurso útil componente para integração em um monitoramento automatizado sistema, como um braço robótico, com vários outros sensores

## REFERÊNCIAS

FILIFELOP.FilipeFlop Componentes Eletrônicos. Florianópolis/SC[2]

CIM AUTOMAÇÃO. Produtos para automação industrial. São Paulo /SP.[1]

BEST-MICROCONTROLLER.Projects.2012.

AFONSO, Ismália, Pesquisa inédita da CNI mostra cenário da indústria 4.0 no Brasil <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/pesquisa-inedita-da-cni-mostra-cenario-da-industria-40-no-brasil/>> Acesso em: 20 de jun. de 2019 [3]

# CAPÍTULO 10

## BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE NIÓBIO ATRAVÉS DA CONCENTRAÇÃO POR PROCESSOS MECÂNICOS E SOLUÇÕES QUÍMICAS: ESTUDO TEÓRICO APROFUNDADO

*Data de aceite: 01/03/2021*

*Data de submissão: 05/01/2021*

### **Luiz Eduardo Ortigara**

Instituto Federal Catarinense  
Campus Luzerna  
Luzerna – Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/6625019275942415>

### **Mario Wolfart Júnior**

Instituto Federal Catarinense  
Campus Luzerna  
Luzerna – Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/6962955293227838>

### **Carlos Wolz**

Instituto Federal Catarinense  
Campus Luzerna  
Luzerna – Santa Catarina  
<http://lattes.cnpq.br/9454628125241957>

**RESUMO:** Nióbio é um metal que tem utilização em ligas de aço microligados, aço inox e aços ferramentas. Sua aplicação siderúrgica, em forma de ferronióbio é de grande interesse à indústria nacional, isso porque 93% do minério está presente em solo brasileiro. Portanto, tecnologias envolvendo o nióbio estão em desenvolvimento, gerando um interesse de maior aproveitamento financeiro e ecológico na produção do minério, que é atendido pelo aumento da concentração final de nióbio após o beneficiamento. Entretanto, pesquisas mais aprofundadas no beneficiamento do minério se encontram fragmentadas ou inacessíveis devido à natureza

sigilosa da indústria, gerando a necessidade de compilar tais informações para auxiliar futuros trabalhos e tecnologias. As principais etapas de beneficiamento de nióbio (lavra do minério; britagem; moagem; deslamagem; e flotação) foram analisadas e comparadas com o processo das minas de Araxá, Catalão e Niobec. A análise demonstrou que todos os processos do beneficiamento irão influenciar diretamente no concentrado final de  $Nb_2O_5$ , sendo proposto algumas formas de melhoria. Na lavra do minério o corte mínimo entre Araxá, Catalão e Niobec é de 2%, 1,65% e 0,7% respectivamente, evidenciando uma diferença bem discrepante, dessa forma uma flotação de menores minérios com menores porcentagens em Araxá e Catalão resultará em retorno econômico, além de diminuir o descarte. Como o minério menor que 10  $\mu m$  (finos) deverá ser descartado na deslamagem, uma moagem mais controlada é necessária, para que o mínimo de finos seja gerado. O descarte dos finos tem uma perda considerável de  $Nb_2O_5$  em Araxá e Niobec, entretanto na mina de Catalão isso não ocorre, cabendo pesquisas mais aprofundadas no processo. A flotação já foi melhor estudada em trabalhos recentes e propostas como: redução de perda de nióbio durante as pré-flotações; e utilização mais eficiente dos reagentes tenderão a aumentar a concentração de nióbio e diminuir os custos envolvidos no processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Beneficiamento, Nióbio, Moagem, Deslamagem, Flotação.

# BENEFICIATION OF THE NIOBIUM ORE THROUGH MECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL SOLUTIONS CONCENTRATION: AN IN-DEPTH THEORETICAL STUDY

**ABSTRACT:** Niobium is a metal which is used microalloyed, stainless and tool steel. The steel industry application, in the form of ferroniobium has been interested the national industry, that happens because 93% of the ore is present in Brazilian territory. Therefore, new technologies involving niobium are under development, generating an interest in better ecologic and financial ore production, that occurs when increasing the final concentration of niobium after its beneficiation. However, the bibliography on niobium ore beneficiation is fragmented or inaccessible due to the confidential nature of the industry, generating the need to compile such information to enable future work and technologies. The main stages of beneficiation of niobium (mining of the ore; crushing; grinding; desliming; and flotation) were analyzed and compared with the Araxá, Catalão and Niobec mines process. The analysis demonstrated that all beneficiation processes will directly influence the final  $Nb_2O_5$  concentrate and some ways of improvement are being proposed. In the mining of the ore the minimum cut between Araxá, Catalão and Niobec is 2%, 1,65% and 0,7% respectively, demonstrating a very discrepant difference, thus a flotation of smaller ores with lower percentages in Araxá and Catalão will result in economic return, in addition to reducing costs. As the ore smaller than 10  $\mu m$  (fines) must be discarded during the desliming, a more controlled grinding is necessary, so that the minimum fines are generated. The disposal of fines has a considerable loss of  $Nb_2O_5$  in Araxá and Niobec, however in the Catalão mine this does not happen, and further research is recommended in the process. Flotation has been better studied in recent studies and proposals such as: reduction of niobium loss during pre-flotation; and more efficient use of reagents will tend to increase the concentration of niobium and decrease the costs involved in the process.

**KEYWORDS:** Beneficiation, Niobium, Grinding, Desliming, Flotation.

## 1 | INTRODUÇÃO

O nióbio (Nb) é um metal que tem se destacado na indústria nacional, isso porque 93% do minério está presente em solo brasileiro. O nióbio pode ser utilizado como refratário pela sua alta temperatura de fusão (2470 °C) quando em estado puro, entretanto sua alta afinidade com o carbono faz com que a maioria do metal seja utilizado no ramo siderúrgico, sendo aplicado em aços microligados, inoxidáveis e ferramentas (JÚNIOR, 2017).

Assim como na siderurgia do aço que beneficia o minério de ferro até transformá-lo em ferro gusa para acrescentá-lo na fusão de ligas de aço, o minério de nióbio é transformado em ferronióbio, que pode ser descrito como uma liga que contém 70% de nióbio e o balanço químico com ferro e titânio.

Analisando que o nióbio também pode ser aplicado em pequenas porcentagens na fundição de outras ligas, este elemento se torna valioso ao ter uma vasta gama de utilidades no ramo siderúrgico.

Em aços microligados a adição de nióbio pode variar de 0,01% a 0,1%, gerando

carbonitreto de nióbio que contribuem com o aumento da resistência ao crescimento de grão durante o reaquecimento do metal pós-laminação. Isso se deve ao nióbio retardar a recristalização da austenita, formando grão deformados e grandes quantidades de contornos de austenita, nucleando os grãos de ferrita de forma mais acelerada e, portanto, gerando grãos menores e uma microestrutura ferrítica refinada (GUIMARÃES, 1997).

Quando utilizado em aços inoxidáveis, o nióbio tem como objetivo precipitar carbonetos de nióbio na matriz. Dessa forma, o cromo se manterá solubilizado na matriz, não precipitando em forma de carboneto de cromo e diminuindo a resistência à corrosão (ROSSITI, 2000).

Provando-se um metal com diferentes aplicações na indústria siderúrgica, além de ser um minério estratégico para a indústria brasileira, o nióbio tem recebido investimento industriais e acadêmicos na busca por novas tecnologias, tendendo a aumentar o consumo do metal de maneira geral (SILVA, 1994); (TEIXEIRA, 2019).

Devido a tendência de maior consumo do nióbio, busca-se maior eficiência financeira e ambiental na extração do minério e seu beneficiamento (concentração), principalmente no cenário a longo prazo do cenário mineral brasileiro. O beneficiamento (ou concentração) do minério de nióbio tem como intuito a retirada de lamas e impurezas aumentando a porcentagem de óxido de nióbio ( $Nb_2O_5$ ) após cada etapa. O processo se inicia com a lavra do nióbio seguindo da moagem, deslamagem, separação magnética e flotação de impurezas.

Como cada um desses processos tem influência no concentrado final, projetos de pesquisa e extensão focados em auxiliar as empresas interessadas desenvolvem tecnologias em diversas áreas: projeto de equipamentos; estudo de reações de reagentes; e o estudo de alterações das variáveis do processo.

Mesmo com a possibilidade de novas pesquisas e do avanço no estado de arte do beneficiamento do nióbio, as informações se encontram desatualizadas ou fragmentadas, fazendo-se necessário um estudo prévio de viabilidade técnica do processo recorrente de beneficiamento de nióbio e possíveis melhorias, para que as pesquisas tenham alcance e consigam auxiliar o cenário nacional.

O presente trabalho procura compilar as informações e discutir a viabilidade técnica e econômica da implementação do beneficiamento de nióbio em laboratório e na indústria, além de apresentar as concentrações esperadas em cada processo.

## **2 | PESQUISAS REALIZADAS: BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE NIÓBIO**

As pesquisas realizadas se basearam em três trabalhos principais: de Souza Paraiso Filho et al. (1993) descreve o processo industrial da mina de Araxá - MG (CBMM); Guimarães e Weiss (1997) analisaram a mina de nióbio da mina de Catalão - GO (CMOC); e dos autores Dufresne e Goyette (2004) que analisaram a produção de ferronióbio na mina

de Niobec, Quebec - Canadá.

Como os minérios de nióbio trabalhados representam diferentes composições química entre si, diferentes metodologias para o beneficiamento foram pesquisadas. Por outro lado, trabalhos atuais em cada processo do beneficiamento foram pesquisados, com o intuito de evidenciar as tecnologias utilizadas atualmente e a evolução do processo.

## 2.1 Lavra e britagem do minério

A lavra do minério do nióbio irá retirá-lo do local com máquinas escavadeiras, já a britagem será o processo responsável por diminuir o minério para o processo posterior de moagem.

Em Araxá a extração ocorre com máquinas escavadeiras com um corte de 2% de  $Nb_2O_5$ , seguido do transporte com caminhões de carga até uma peneira vibratória de 21 m x 4,2 m, com o sobreposto sendo britado em uma britadora de mandíbulas. Quando o minério for menor que 50,8 mm segue para a etapa de moagem (DE SOUZA PARAISO FILHO ET AL.,1993).

Na mina Niobec a extração é realizada diretamente no subterrâneo e segue diretamente para uma britadora de mandíbula com saída de 100 mm para a moagem (DUFRESNE E GOYETTE, 2004).

Guimarães e Weiss (1997) não deixam claro a forma de extração em Catalão, entretanto é usada uma separadora vibratória com grades e uma britadora de mandíbulas com saída de 25,4 mm. Diferentemente de Araxá, o sobreposto é descartado.

## 2.2 Moagem, separação magnética e deslamagem

### 2.2.1 Moagem

Esta operação se refere à redução da granulometria do material. O processo se resume à um equipamento moedor com alta dureza e resistência à abrasão sendo capaz de reduzir o tamanho de grão do minério sem o desgaste excessivo da máquina (GAGGIATO, 2021).

Usualmente o processo industrial utiliza um moinho de bolas ou um moinho de barras, onde as bolas ou as barras são as responsáveis pelo processo de moagem ao realizar abrasão no minério. Tanto para as bolas quanto para as barras recomenda-se aços com resistência ao impacto e resistência à abrasão com tratamentos termoquímicos como cementação ou nitretação.

Juntamente com o processo de moagem, o monitoramento e controle da granulometria tem influência direta no concentrado final de  $Nb_2O_5$ , isso ocorre pois se a granulometria for excessivamente pequena, o minério poderá ser eliminado junto com as lamas nos processos posteriores de deslamagem e flotação. Dessa forma, o processo de

peneiramento e de moagem ocorrem simultaneamente (DE SOUZA PARAISO FILHO ET AL., 1981).

## 2.2.2 Separação Magnética

Denomina-se separação magnética como um conjunto de separações baseadas na diferença de suscetibilidade magnética dos minerais, e se apoiam no seu comportamento quando submetidos à ação de um campo magnético externo (SANTAGOSTINO, 1997).

O processo de separação é dividido a seco e a úmido e pela intensidade do campo magnético responsável pela retirada, ou pela concentração, do material magnético desejado. No caso de minério de nióbio, a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) é uma impureza devendo ser utilizado um separador de baixa intensidade e à úmido, conforme indicado por Crisóstomos (2015).

## 2.2.3 Deslamagem

A deslamagem é um dos processos com maior custo benefício no beneficiamento do nióbio, isso porque retira uma boa parte das lamas, em especial as menores que 10  $\mu\text{m}$  (denominado como finos), já que estas irão influenciar negativamente no processo posterior de flotação.

Para realizar a deslamagem são utilizados hidrociclones e mini-hidrociclones (são classificados mini-hidrociclones quando o diâmetro da parte cilíndrica é menor que 10 mm) que utilizam a força centrífuga com o intuito de separar materiais utilizando a densidade como parâmetro (MOGNON, 2015). Conforme indicado na Figura 1, a geometria dos hidrociclones apresenta duas regiões: a parte superior que consiste em uma região cilíndrica onde há uma saída superior denominada overflow onde a corrente pobre em sólidos irá passar, além disso, também é composta por um tubo que se insere no seu topo chamado de *vortex finder*. Logo abaixo, como prolongamento da parte superior, encontra-se uma região cônica que apresenta uma saída inferior chamada de *underflow* ou *apex* sendo o local onde a corrente rica em sólido passará.

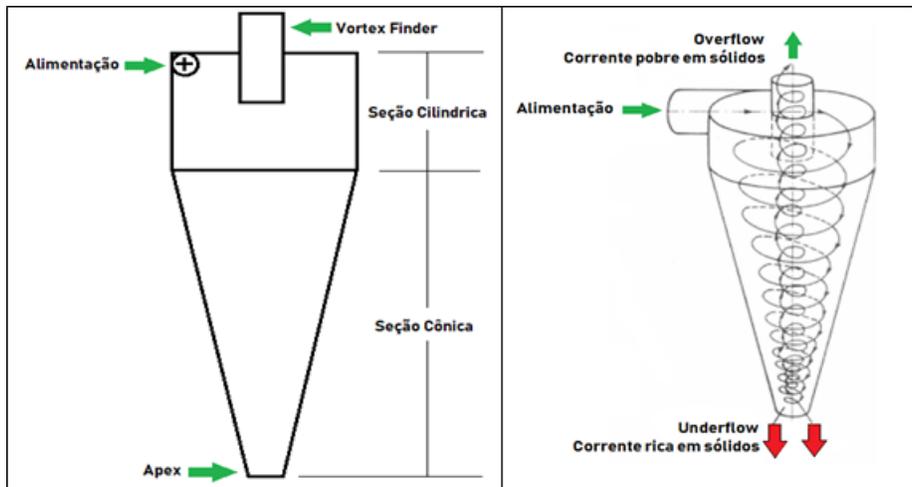


Figura 1: Partes de um mini-hidrociclone.

Fonte: Os autores.

Inicialmente, o minério, em formato sólido-líquido, é bombeado para dentro do mini-hidrociclone tangenciando o diâmetro interno (alimentação). Devido a geometria do mini-hidrociclone e o fato da polpa entrar na alimentação pressurizada, desenvolve-se um movimento rotacional descendente, dessa forma, as partículas mais densas tendem a ocupar as regiões mais próximas à parede do equipamento, sofrendo uma maior ação das forças centrípeta e gravitacional. Já as partículas menos densas são deslocadas para a região central do equipamento.

Devido ao *apex* ter uma abertura relativamente pequena, apenas parte do material é capaz de escoar para fora da abertura, desse modo irá ocorrer um estrangulamento em que será formado um vortex (ciclone) ascendente interno em que as partículas menores subirão através da corrente gerada e, assim, serão descarregadas no *vortex finder* através do *overflow* (MOGNON, 2015).

#### 2.2.4 Processo em Araxá

A moagem do minério utilizará apenas um moinho de bolas, juntamente com um processo cíclico com classificadores (separadores) que consistem em quatro ciclones direcionando o underflow de 150 mesh para a separação magnética e o overflow irá retornar para o moinho de bolas. Na sequência, um separador magnético de baixa intensidade (800 a 900 Gauss) irá retirar de 10 a 25% de magnetita do minério, o material não-magnético segue para a deslamagem.

Segundo de Souza Paraiso Filho et al. (1981) a deslamagem na mina de Araxá é um processo de grande importância para a futura flotação, isso porque a flotação é muito

sensível a presença de lama que está presente, em quantidade considerável, em grãos menores que 5  $\mu\text{m}$ . Entretanto, deve-se notar que uma quantidade considerável de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (5%) se encontra na granulometria menor que 37  $\mu\text{m}$ , portanto a retirada deve ser muito eficiente, eliminando apenas grãos menores que 5  $\mu\text{m}$ .

Três estágios de deslamagem são realizados em duplicata. O primeiro estágio usa hidrociclones de 381 mm, o underflow irá passar para o próximo estágio e o overflow passa por máquinas de atrito (*scrubbers*), que tem como intuito atritar as partículas para liberar lamas retidas para passar novamente por uma série de hidrociclones de 381 mm, o underflow gerado irá para o processo de flotação

O segundo estágio utiliza a mesma metodologia do primeiro estágio, mas com hidrociclones de 100 mm. O terceiro estágio passa por hidrociclones de 25,4 mm, sem passar pelo *scrubber*, o overflow é descartado e o underflow segue para um processo de flotação de partículas finas (DE SOUZA PARAISO FILHO et al., 1981).

### 2.2.5 Processo em Catalão

O minério menor que 25,4 mm passa por moagem em um moinho de barras e segue para um ciclone classificador, o overflow segue para a deslamagem e o underflow passa por um moinho de bolas e por uma separação magnética, responsável por retirar até 16% de magnetita da massa do minério que é descartada, em sequência o minério passa por nova moagem em um moinho de bolas seguindo por classificação e deslamagem.

A deslamagem em laboratório tem como objetivo retirar todas as partículas menores que 10  $\mu\text{m}$ , iniciando em uma peneira vibratória de 208  $\mu\text{m}$  e classificado em um hidrociclone de 40 mm, o underflow segue para um moinho de barras até passar na peneira de 208  $\mu\text{m}$ , enquanto o overflow é deslamado por um mini-hidrociclone de 25 mm. A retirada de lamas chega em até 31% da massa.

Na indústria, as partículas menores que 5  $\mu\text{m}$  são retiradas por hidrociclones de 100 mm e 25,4 mm que seguem para um espessador (uma grande piscina onde água limpa fica na parte superior e o sólido que é mais denso fica na parte inferior) e para a reciclagem de água. Enquanto as partículas maiores que 5  $\mu\text{m}$  seguem para a flotação (GUIMARAES E WEISS, 2003).

### 2.2.6 Processo em Niobec

O processo de moagem inicia com um moinho de barras de 3,2 m x 4,267 que segue para 12 peneiras vibratórias com abertura de 230 mm. A parte superior segue para um moinho de bolas enquanto a inferior segue para o circuito de deslamagem.

Na mina de Niobec, o circuito de deslamagem é designado para retirar as partículas menores que 10  $\mu\text{m}$  previamente a flotação, nota-se um padrão de retirada de lamas de pequena dimensão que tem relação direta com a eficiência da flotação.

Inicialmente o caldo é diluído em 18% de sólido e bombeado para 7 hidrociclones de 254 mm, com vortex de 100 mm e apex de 45 mm. O overflow de 4% a 6% de sólidos segue para um segundo estágio com 50 hidrociclones de 100 mm com vortex de 25,4 mm e apex de 15,875 mm. O underflow resultante é enviado para um espessador de 85' e segue para área de resíduos.

Os ciclones conseguem remover todas as partículas menores que 7  $\mu\text{m}$  e mantendo em quase totalidade as partículas com mais de 20  $\mu\text{m}$ , sendo reduzido 18% do peso com remoção de 15% do pirocloro (DUFRESNE E GOYETTE, 2001).

Por fim, a separação magnética é realizada no underflow resultante da deslamagem.

## 2.3 Flotação

O conceito de flotação é a separação do concentrado almejado, por meio do controle da hidrofobicidade de diferentes minerais numa polpa ao utilizar reagentes químico específicos. Na flotação do nióbio bolhas de ar são inseridas na polpa, as partículas hidrofóbicas irão colidir e aderir nas bolhas sendo transportadas para a espuma (OLIVEIRA, 2007). Após a separação, a espuma será transportada e separada da polpa e então será arrastada hidráulicamente (mesmo sem ocorrer a adesão). Dessa forma a polpa passará para um processo mais intenso de separação ou será descartada, enquanto a espuma é coletada (ALVES, 2015).

Convencionalmente, o processo de separação polpa/espuma ocorre em células mecânicas de flotação. A célula é um sistema que conta com um rotor introduzido em um reservatório juntamente com um aerador, o rotor irá agitar a polpa, enquanto o aerador rompe o ar em pequenas bolhas que entra no sistema, dessa forma a turbulência gerada pelo rotor realizará a colisão das partículas com as bolhas, ocorrendo a adesão (SANTANA, 2007 apud ALVES 2015). A espuma, com menor densidade, irá cair pelas calhas da célula, enquanto o material de rejeito passa pelo fundo da máquina seguindo para processos de flotações mais rigorosas. A Figura 2 apresenta o funcionamento de uma célula de flotação.

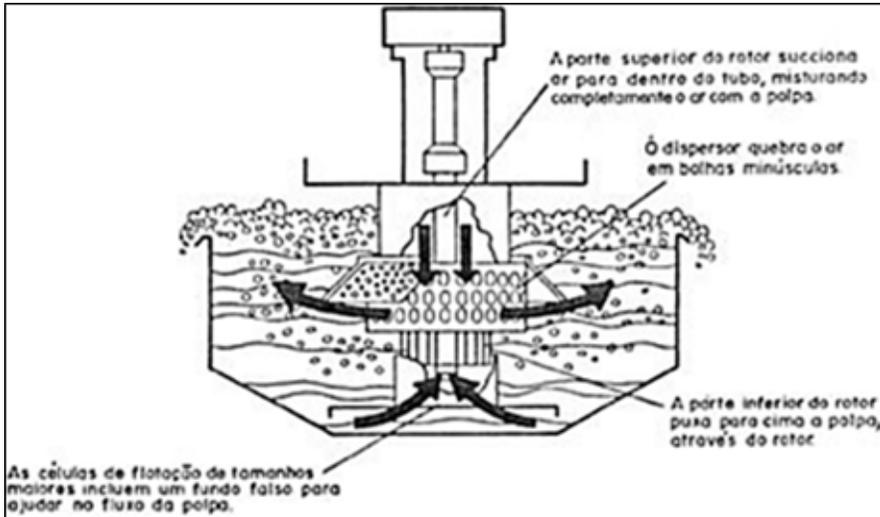


Figura 2: Funcionamento de uma célula de flotação.

Fonte: Luz et al., 2004 apud Alves, 2015.

De maneira alternativa às células, a coluna de flotação é um componente estático que por ter as bolhas de ar geradas por aerador e não com um rotor movimentando (que desgasta mais e tem menor vida em fadiga), reduz o custo de manutenção mecânica da coluna e aumentando sua vida útil.

Conforme Aquino e Oliveira (2006), na coluna de flotação as partículas minerais interagem com as bolhas de ar ascendente, introduzidas na base da coluna, resultando no processo de coleta das partículas hidrofóbicas (possuem repulsão à água). O agregado partícula-bolha formado é transportado até a seção de limpeza, onde é deslocado com a água de lavagem introduzida no topo da coluna. A água de lavagem tem o objetivo de promover a estabilidade e limpeza da espuma. As partículas minerais hidrofóbicas coletadas constituem a fração flotada, sendo separadas das partículas hidrofílicas (possuem afinidade com a água), que saem pela base da coluna e constituem a fração não flotada. O funcionamento é demonstrado na Figura 3.

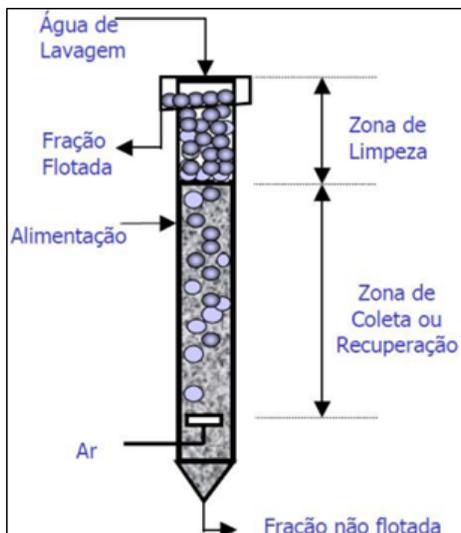


Figura 3: Representação esquemática de uma coluna de flotação.

Fonte: Luz, 1998 apud Alves, 2015.

### 2.3.1 Reagentes de Flotação

Os reagentes têm como função garantir hidrofobicidade às partículas que irão ser separadas da polpa. A quantidade e o tipo de reagente irão depender diretamente do tipo de minério e da sua composição química. Os reagentes podem ser classificados em coletores ou espumantes, modificadores ou reguladores (ASSIS, 2014).

Coletores são reagentes que têm um polo carregado que irá reagir com partículas carregadas presentes nos minérios, tem como principal função tornar a superfície do mineral hidrofóbica para ser coletada no processo. Na flotação do nióbio ácidos gordos são utilizados para retirar minerais carbonatos (que tendem a consumir muito ácido diminuindo a estabilidade do processo) e aminas que, quando em contato com a polpa, se tornam catódicas e se ligam aos materiais carregados do minério (GUPTA E YAN, 2016).

Espumantes são surfactantes, usualmente compostos heteropolares composto por álcoois e éteres de poliglicol (GUPTA E YAN, 2016). Os espumantes têm como função adsorver a interface água/ar reduzindo, assim, a tensão superficial da água. Como consequência, as bolhas formadas na espuma serão menores e mais estáveis, não estourando e carregando o concentrado até o exterior da célula/coluna de flotação.

Ativadores/depressantes têm como função reter os minerais para que não sejam retirados com os coletores. Para a retirada do pirocloro é comumente utilizado ácido oxálico que é facilmente ligado com a calcita, explicando a necessidade da retirada de tal mineral previamente a flotação do pirocloro (GUPTA E YAN, 2016).

### *2.3.2 Processo de Flotação na mina de Niobec*

O processo inicia com a adição de ácidos gordos, juntamente com silicato de sódio. O silicato serve para evitar a formação de uma sopa insolúvel do ácido gordo. Os reagentes são utilizados para coletar a calcita do minério em tanques de 2,43 m x 2,43 m com um tempo de 15 minutos.

Após a retirada da calcita, a água é trocada em um processo semelhante ao de deslamagem, a polpa é misturada com água potável e passa por 3 hidrociclones de 254 mm com vortex de 63,5 mm e apex de 34,925 mm. O overflow é bombeado para outros 9 hidrociclones de 100 mm com vortex de 25,4 mm e apex de 12,7 mm. Ambos os underflow são levados para espessadores. O processo reduz os sais presentes em até 250%.

A flotação do pirocloro é realizada com o coletor acetato de diamina de sebo emulsificado em um pH de 6,8 a 7,5 mantido com uma mistura de 50/50 de ácido oxálico e ácido fluorídrico. Em seguida o pirocloro é flotado em 5 estágios de limpeza onde o pH é reduzido gradualmente até 2,7 que terá como consequência a depressão de todos os minerais menos o pirocloro e a pirita. Como a pirita compreende 20% do minério após a limpeza, é utilizado Amil Potássio Xantato (PAX) como coletor e hidróxido de sódio (visando retornar o pH para acima de 7) retirando até 95% da pirita.

Visando um descarte correto, a pirita é enviada para espessadores de 6,096 m e, quando em 50% de sólidos a polpa é enviada para 4 tanques de 1,524 m x 2,44 m onde ácido clorídrico é adicionado em taxas de 2,6 kg/ton dissolvendo a apatita presente.

Uma segunda flotação ocorre em um pH de 10,5 utilizando PAX e NaOH e sulfato de cobre é adicionado para retirar as sulfitas remanescentes.

O concentrado final de  $Nb_2O_5$  é de aproximadamente 58% e é enviado para o processo de transformação de ferronióbio.

### *2.3.3 Processo de flotação em Catalão*

Várias tentativas foram realizadas para retirar o silicato do minério durante a flotação de pirocloro, tendo pouco sucesso. Portanto uma pré-flotação é realizada utilizando amido como dispersante e eteramina como coletor. Nota-se um fenômeno interessante no processo de Catalão, isto porque a mina é separada em Catalão I e II, entretanto a pré-flotação dos silicatos, seja nos grãos mais finos ou mais grossos, apresentaram uma diferença no consumo de reagente de 350% para o amido (400 g/ton para Catalão I e 1400 g/ton para Catalão II) e 560% para a eteramina (50g/ton para Catalão I e 280 g/ton para Catalão II). A diferença evidencia que o aumento da eficiência em um processo de beneficiamento é algo específico para cada minério, seja na utilização dos reagentes ou nas máquinas utilizadas.

Após a retirada dos silicatos é utilizado um processo de flotação para os grãos finos e para os grãos grossos com uma concentração final de 54% para Catalão I e 64% para

Catalão II. Por fim soda cáustica é utilizada para remover quantidade pequenas de fósforo e enxofre, com um concentrado final de 64% de  $Nb_2O_5$ . Não há muitos detalhes sobre os reagentes utilizados necessitando pesquisas mais recentes para conferir se o valor confere.

### 2.3.4 Processo de flotação em Araxá

Diferentemente das outras três minas, o processo de pré-flotação em Araxá não ocorre, entretanto, maiores detalhes de como a calcita e os silicatos agem interferem na concentração final não estão disponíveis. Dessa forma, a flotação do pirocloro deslamado (originado do underflow dos hidrociclone de 381 mm e 100 mm) se inicia diretamente com o processo de flotação por espuma seletiva em um condicionador (DE SOUZA PARAÍSO FILHO et al., 2001).

O coletor utilizado é Acetato de diamina (amina do tipo catódico). O depressante é o MC553 da Henkel e para os ativadores do pirocloro são utilizados tanto ácido fluorídrico como fluorsilicato de sódio. Ácido hidrocloreídrico é usado para reduzir o pH para 3,5 a 2,5.

Saindo do condicionador, é iniciada a flotação “rougher” na espuma em 8 células de flotação de 8,5 m<sup>3</sup>. O concentrado é enviado para um espessador de 36 m para ajustar a porcentagem de sólidos até 25%. A polpa resultante segue para um próximo condicionador com a mesma quantidade de ativadores e coletores preparando a flotação de limpeza.

A flotação de limpeza consiste em quatro estágios em um circuito fechado com o estágio anterior. O primeiro estágio consiste em 5 célula de 8,5 m<sup>3</sup>, o segundo estágio 4 células de 4,8 m<sup>3</sup> e o terceiro e o quarto estágio contam com 6 células de 1,7 m<sup>3</sup> cada.

## 3 | COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO DAS MINAS DE NIOBEC, CATALÃO E ARAXÁ E PROPOSTA DE MELHORIA

Analisando os processos de flotação nas minas de Araxá, Catalão e Niobec nota-se que todos os processos influenciam diretamente a porcentagem final de  $Nb_2O_5$ .

Na coleta do minério, há uma diferença significativa no corte do Nb, enquanto a mina de Niobec trabalha com percentuais próximos aos 0,7% (DUFRESNE E GOYETTE, 2004), a mina de Araxá tem o corte mínimo de 2% (FO et al., 1993), a porcentagem relativamente alta do corte mínimo na mina de Araxá se explica pelo fato da média de  $Nb_2O_5$  alcançar valores de 3%, não necessitando maior aproveitamento de minérios com menor teor de Nb que são descartados. Deve-se notar, entretanto, que os minérios descartados ainda têm valor econômico, podendo ser beneficiados para retirada de outras matérias-primas, ou utilizando a planta de beneficiamento de menores teores de  $Nb_2O_5$  como a de Niobec.

A moagem do minério terá como objetivo a redução da granulometria do minério para os processos seguintes de separação magnética e deslamagem. Mesmo sendo uma operação simples, tanto a moagem quanto a separação por peneira ou por ciclone classificador devem ser feitas de maneira eficiente, isso ocorre porque o grão deve estar

acima de 10  $\mu\text{m}$  para não atrapalhar na flotação. Como exemplo, a mina de Niobec perde 18% do peso e 15% de pirocloro ao eliminar partículas menores que 9  $\mu\text{m}$ . Na mina de Araxá 12% do peso é perdido juntamente com 5 a 7% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , em Catalão, entretanto, a perda se mostra muito pequena, reduzindo 16% do peso e apenas 0,7% de redução de nióbio. Recomenda-se, portanto, uma moagem e uma classificação mais eficiente, não reduzindo demais o tamanho do grão.

A deslamagem é o processo intermediário para a seleção do minério que irá seguir, retirando os grãos menores que 10  $\mu\text{m}$  para não influenciarem negativamente na flotação. Deve-se notar, entretanto, que na mina de Araxá e de Catalão retiram os grãos menores que 5  $\mu\text{m}$ , enquanto a mina de Niobec retira os grãos menores que 10  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, recomenda-se pesquisar o tamanho mínimo do grão que irá influenciar na flotação e aplicá-lo no processo de deslamagem, para que a perda de Nióbio seja reduzida.

Na etapa de flotação, Gibson et al. (2015), após realizar a revisão do processo nas minas de Araxá, Catalão e Niobec, determinou alguns pontos em comum como: todas as operações focam em retirar os minerais silicatos, sendo por meio da flotação direta no caso de Araxá ou por uma pré-flotação nas outras duas minas; e a flotação de pirocloro ocorre utilizando um coletor de amina com uma diminuição progressiva do pH.

Visando aumentar a concentração final, Gibson et al. (2015) determina alguns problemas a serem resolvidos: perda de nióbio durante as pré-flotações de silicatos ou da calcita; consumo elevado de reagente caros (como o ácido oxálico); e circuitos complicados que visam uma troca brusca entre pH ácidos e básicos (como por exemplo na mina de Niobec para retirar a pirita) levando a necessidade de mais estágios de limpeza.

## AGRADECIMENTO

Agradecimento especial ao Laboratório de Ensaios Mecânico e Metalúrgicos – LABEMM e ao Instituto Federal Catarinense Campus Luzerna.

O trabalho foi fomentado pelo CNPQ por meio do Edital PIBITI 12/2019.

## REFERÊNCIAS

ALVES, L. P. **Implantação de coluna de flotação no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, Unidade Araxá e realização de estudo exploratório [monografia]**. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

AQUINO, J. A.; OLIVEIRA, M. L. M. **Aspectos Relevantes das Colunas de Flotação**. XXI ENTMMME. Rio Grande do Norte, 2006.

ASSIS, V. F. De. **Uso de dispersante nas etapas de concentração de nióbio**. Especialização em tratamento de minérios. Universidade Federal de Goiás. Catalão - GO. 2014

CRISÓSTOMO, Rejane Cristina. **A separação magnética de minérios de ferro no Brasil: uma revisão**. 2015.

DUFRESNE, Claude; GOYETTE, Ghislain. The production of ferroniobium at the Niobec mine. In: **International Symposium on Niobium 2001**. 2001. p. 29-35.

FO, O. de Souza Paraiso; DE FUCCIO JR, Rafael; BETZ, E. W. **Mining, Ore preparation and niobium-based materials production at Araxá**, Brazil. High Temperature Materials and Processes, v. 11, n. 1-4, p. 119-138, 1993.

GAGGIATO, Vitor. **TRATAMENTO DE MINÉRIOS: CONCEITOS, COMUNIÇÃO, BRITAGEM E MOAGEM**. Disponível em: <https://www.infrabrasil.net.br/tratamento-de-minerios/#:~:text=H%C3%A1%20diversos%20tipos%20de%20britadores,britador%C3%B4nico>. Acesso em: 04 jan. 2021.

GUIMARÃES, Valdir Alves. **Influência da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e no micromecanismo de fratura de um aço microligado com nióbio e titânio**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas; 1997, 157p. 1997. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado).

GUPTA, Ashok; YAN, Denis S. **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier, 2016.

JUNIOR, R. F. P. **Nióbio**. Economia Mineral do Brasil. 2009.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 4ª ed. 2004.

MOGNON, José Lucas. et. al. **Mini-hidrociclones aplicados ao sistema de controle de sólidos na perfuração de poços de petróleo**. 2015.

OLIVEIRA, José Farias de. **Flotação**. 2007

ROSSITTI, S. M. **Efeito do nióbio na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável superduplex fundido SEW 410 W. Nr. 1.4517**. 2000. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)–Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANT'AGOSTINO, Lilia Mascarenhas. **Caracterização tecnológica de um depósito mineral-um estudo de caso: o nióbio de Catalão I, Goiás**. 1996. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SANTANA, R. C. **Efeito da Altura da Coluna de Flotação de Minério Fosfático em Diferentes Granulometrias**. Tese de Doutorado. PPG-EQ/UFU-Uberlândia/MG, 2011, 192 p.

SILVA, L. G. O. **Nióbio: Mercado Nacional e Internacional**. Dissertação de mestrado - UNICAMP. Campinas - SP. 1994.

TEIXEIRA, L.B. **Nióbio - monopólio brasileiro**. UOL, Curitiba. 2019. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2019/06/28/niobio-comercio-limitado-monopolio.htm>.

## ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DE ECLUSAS PARA OS COMBOIOS PADRÃO TIETÊ

Data de aceite: 01/03/2021

Data de submissão: 22/01/2021

**Antonio Eduardo Assis Amorim**

CEETEPS, Faculdade de Tecnologia de Jahu  
Jahu – SP

Lattes: 4242755073262801

ORCID: 0000-0001-9567-2966

**RESUMO:** A hidrovía Tietê-Paraná é um importante corredor para escoar a produção de grãos da região Centro-Oeste e uma boa porcentagem de colisões ocorre em manobras de aproximação para entrar na câmara da eclusa, devido as condições climáticas e comportamentais da tripulação. Embora a modelagem matemática do comboio seja conhecida, o comportamento do comboio em águas restritas sob a ação de ventos e ondas é um assunto recente. Desta forma este trabalho procura estudar o comportamento do comboio sob estas condições, procurando identificar estratégias de operação e capacidade de manobra. Com estas informações, pretendemos desenvolver um sistema de controle que auxilie o comandante para este tipo de manobra de aproximação e entrada na câmara da eclusa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Segurança da navegação. Hidrovía. Modelagem matemática. Modelo reduzido. Sistema de controle.

### STUDY AND DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF TRANSPOSITION OF LOCKS FOR THE TIETÊ STANDARD CONVOYS

**ABSTRACT:** The Tietê-Paraná waterway is an important corridor to drain grain production from the Midwest region and a good percentage of collisions occurs in approach maneuvers to enter the lock chamber, due to the climatic and behavioral conditions of the crew. Although the mathematical modeling of the convoy is known, the behavior of the convoy in restricted waters under the action of winds and waves is a recent subject. Thus, this paper seeks to study the behavior of the paper under these conditions, seeking to identify strategies of operation and maneuverability. With this information, we intend to develop a control system that assists the commander for this type of approach maneuver and entry into the lock chamber.

**KEYWORDS:** Navigation safety. Waterway. Mathematical modeling. Reduced model. Control system.

## 1 | INTRODUÇÃO

A região Centro-Oeste do Brasil é um importante centro produtor agrícola, tendo uma participação de 43,2 % de toda a produção nacional e boa parte da produção se destina ao porto de Santos, empregando em maior intensidade os modais ferroviário ou hidroviário (MATA *et al.*, 2017). A hidrovía Tietê-Paraná possui um trecho navegável de 2400 km composta de 8 barragens com 10 eclusas e 5

barragens sem eclusas. As eclusas possuem dimensões para a passagens de embarcações tipo Tietê, que apresentam 137 m de comprimento, 11 m de largura, 7 m acima da linha d'água e calado de 2,5 m a 2,80 m.

Os comboios utilizados da Hidrovia Tietê-Paraná possuem sistema de propulsão e governo formado por hélice de passo fixo e leme e que utilizam a formação 2x2 (um empurrador e quatro barcaças – duas colunas).

De acordo com os dados registrados nos acórdãos do Tribunal Marítimo da Marinha, até meados de 2000 boa parte dos acidentes ocorriam envolvendo colisão dos comboios com os vãos das pontes. Após a instalação de dispositivos de proteção para as colunas das pontes, a incidência maior dos acidentes se dá na operação de aproximação dos comboios em direção às eclusas (AMORIM; PADRONI; LUKINE, 2017). A razão desta incidência de acidentes ocorre em parte porque os comboios não dispõem de propulsão azimutal e porque há uma pista de ventos considerável presente nas proximidades da eclusa de forma que ventos e ondas consideráveis incidem na embarcação e porque a manobra se dá em trechos de baixa profundidade, afetando o seu comportamento de manobra.

A modelagem matemática para comboios é bem conhecida na literatura, requerendo apenas a caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos (FOSSEN, 1994). (BRARD, 1951) em ensaios no tanque de provas percebe que o coeficiente de arrasto da embarcação varia em função da profundidade, assim como as manobras dependem da dimensão da embarcação. (PADOVEZI, 2003; PADOVEZI *et al.*, 2008; PADOVEZI; GANDARA, 2009) mostram que os comboios que navegam na hidrovia apresentam tempos longos de respostas aos comandos do comandante. (AMORIM; MENDONÇA; TROVATI, 2011; OLIVEIRA; TROVATI, 2011; TROVATI *et al.*, 2011) analisam o comportamento dos ventos e ondas na hidrovia e os efeitos nas manobras da embarcação.

(KING *et al.*, 2008a; KING; YASUKAWA; HIRATA, 2008; KOH; YASUKAWA; HIRATA, 2008) estudam por meio de simulação computacional, o comportamento hidrodinâmico de vários arranjos de comboios em manobras de zig-zag e de curvatura e mostram que os coeficientes hidrodinâmicos dependem do ângulo de deriva.

(KING; YASUKAWA; HIRATA, 2008) observam que, em águas restritas, os parâmetros hidrodinâmicos e os índices utilizados para a parametrização de uma embarcação variam com a profundidade.

(YUBA, 2014) analisa os comportamentos de diferentes tipos de propulsores na hidrovia.

(AMORIM; PADRONI; LUKINE, 2017) analisam questões comportamentais que afetam o desempenho da tripulação nas manobras. De acordo com o relato dos comandantes, as manobras são mais arriscadas quando há ventos fortes nas proximidades da eclusa.

Em vista da ocorrência de acidentes nas manobras de aproximação nas eclusas, este trabalho apresenta os resultados obtidos tanto na simulação matemática quanto em

um modelo reduzido, em uma manobra de aproximação. O modelo é desenvolvido usando a plataforma Arduino, com acelerômetro e uma câmera de vídeo a bordo do comboio. Na eclusa estão dispostos dois sinais luminosos que servem para orientar o posicionamento do comboio.

## 2 | MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem mais simples que descreve o comportamento hidrodinâmico de um comboio envolve três graus de liberdade, movimento avante (X), de caimento (Y) e de deriva (N). Nesta modelagem, a massa é considerada constante, o centro de gravidade da embarcação está na origem ( $\vec{r}_c = \vec{0}$ ), os eixos principais do momento de inércia coincidem com os eixos do Sistema de referência móvel,  $I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z)$  e a embarcação tem um eixo de simetria xz.

A modelagem matemática envolve as forças devido a hidrodinâmica, propulsão, leme, peso, empuxo, ondas, ventos e manobras em águas restritas.

Quando a embarcação se move, parte do fluido se move junto com a embarcação, tornando a embarcação mais pesada (FOSSEN, 1994; IMLAY, 1961). As equações envolvem termos cruzados das velocidades e de suas coordenadas (MILNE-THOMSON, 1962) e, como o comboio se desloca com velocidades baixas, termos quadráticos ou de ordem superior são desprezados. Portanto, a equação que descreve o movimento da embarcação é

$$\begin{aligned} X_H + X_P + X_R + X_W + X_w &= (m + m_x)(\dot{u}) + (m + m_y)vr, \\ Y_H + Y_R + Y_W + Y_w &= (m + m_y)(\dot{v}) + (m + m_x)ur, \\ N_H + N_R - (Y_H + Y_R)x_g + N_W + N_w &= (I_z + J_r)\dot{r}. \end{aligned} \quad (1)$$

na qual os termos  $m_x$ ,  $m_y$  são as massas adicionais e  $J_x$  é o momento de inércia adicional,  $m$  é a massa do comboio,  $X$  é a força que atua na direção avante,  $Y$  é a força que atua na direção de caimento e  $N$  é o torque que age na deriva,  $I_z$  é o momento de inércia do comboio,  $r$  é a rotação do comboio em torno do eixo z e  $u$  e  $v$  são as velocidades a vante e na lateral, respectivamente. Utilizamos para a simulação os dados extraídos por (KING *et al.*, 2008b).

As forças  $X$ ,  $Y$  e  $N$  são devido a ação do propulsor (índice P), leme (índice R), vento (índice W), ondas (índice w) e amortecimento hidrodinâmico (índice H).

Alguns autores utilizam termos lineares, quadráticos ou ambos para o termo de amortecimento hidrodinâmico (FOSSEN, 1994; KING *et al.*, 2008b; YUBA, 2014). Usaremos a abordagem usando termos quadráticos. A força hidrodinâmica de amortecimento que age sobre todo o casco do comboio em uma manobra é principalmente gerada pela pressão do fluido. O fluxo ao longo do casco está ligado ao comprimento do comboio e ao deslocamento do calado, de forma estas duas grandezas podem ser usadas para expressar a força

hidrodinâmica sobre o casco. A velocidade do comboio U é

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (2)$$

e as forças hidrodinâmicas  $X_H$ ,  $Y_H$  e  $N_H$  são expressas na forma

$$\begin{aligned} X_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 X'_H(\beta, r'), \\ Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d U^2 Y'_H(\beta, r'), \\ N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 N'_H(\beta, r'). \end{aligned} \quad (3)$$

na qual  $\rho = 1000 \text{ kg / m}^3$  é a densidade da água, L é o comprimento do comboio, d é o calado,  $r'$  é a quantidade

$$r' = r \frac{L}{U} \quad (4)$$

e

$$\beta = \text{atan} \left( -\frac{v}{u} \right). \quad (5)$$

Os termos são definidos como segue

$$\begin{aligned} X'_H &= X'_0 \cos^2 \beta + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta r} \beta r' + X'_{rr} r'^2, \\ Y'_H &= Y'_\beta \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta r} \beta^2 r' + Y'_{rr} \beta r^2 + Y'_{rrr} r^3, \\ N'_H &= N'_\beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta r} \beta^2 r' + N'_{rr} \beta r^2 + N'_{rrr} r^3, \end{aligned} \quad (6)$$

na qual  $X'_0$  é o coeficiente de resistência ao avanço do comboio e os demais coeficientes são derivadas hidrodinâmicas obtidas da expansão dos termos. (KING *et al.*, 2008b) descarta os termos  $Y'_{\beta r}$ ,  $Y'_{rr}$ ,  $N'_{\beta r}$  e  $N'_{rr}$  pela dificuldade em determinar tais valores com boa precisão. Os valores destes parâmetros, na simulação, seguem os adotados em (KING *et al.*, 2008b). O peso do comboio se equilibra com a força empuxo.

A propulsão de um comboio é formada por um conjunto de dois propulsores convencionais, de forma que a contribuição é dada por

$$X_P = \sum_1^2 (1 - t) T_P, \quad (7)$$

na qual t é o coeficiente de redução da força propulsora. O empuxo de cada propulsor é

$$T_p = \rho n^2 D_p^4 K_T(J, p), \quad (8)$$

na qual  $n$  é a rotação do motor,  $D$  é diâmetro do hélice,  $K_T$  é o coeficiente de empuxo, sendo função do coeficiente de avanço  $J$  e do passo do hélice  $p$ ,

$$J = u \frac{1 - w_p}{n D_p}, \quad (9)$$

na qual  $w_p$  é coeficiente de esteira, que representa a redução da velocidade de escoamento do fluido na esteira da popa do navio, onde se localiza o propulsor, e depende do formato do casco.

(YUBA, 2014) assim como (KING *et al.*, 2008b) estudaram a navegação na hidrovia usando hélice de diâmetro pequeno, com diâmetro de 1,8 m e rotação de 300 rpm de forma que para esta característica,

$$K_T(J, P) = -0,326pJ - 0,2005J + 0,5234p - 0,0398. \quad (10)$$

(KING *et al.*, 2008b; YUBA, 2014) utilizam a fórmula de Hirano para o coeficiente de esteira, que relaciona o coeficiente de esteira com o ângulo

$$w_p = w_{p0} e^{c_1 \beta_p^2}, \quad (11)$$

onde  $w_{p0}$  é o coeficiente de esteira para o movimento de avanço,  $C_1$  é um fator de correção e  $\beta_p$  é o ângulo de deriva do propulsor

$$\beta_p = \beta - l' r', \quad (12)$$

na qual  $l'$  é a razão da distância do propulsor ao CG ( $dp_{CG}$ ) do comboio pelo comprimento do comboio (LOA),

$$l' = \frac{dp_{CG}}{LOA}. \quad (13)$$

Os valores a serem utilizado seguem os empregado por (KING *et al.*, 2008b; YUBA, 2014). As forças e momento devidos ao leme é

$$\begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ N_R \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} (1 - t_R) \sum F_N \sin \\ (1 - a_H) \sum F_N \cos \delta \\ -(x_R + a_H x_H) \sum F_N \cos \delta \end{pmatrix} \quad (14)$$

na qual  $t_R$  é um coeficiente que incorpora a redução na resistência comparada com a componente longitudinal da força sobre o leme;  $a_H$  é o coeficiente de força no eixo decorrente da perturbação do fluxo ao redor do casco sendo proporcional a força do leme;  $x_H$  denota a posição longitudinal do ponto de aplicação da força adicional devido ao casco

e  $x_R$  é a posição do leme no eixo  $Ox$  e  $\delta_R$  é o ângulo do leme,

$$\delta_R = \operatorname{atan}\left(\frac{v_R}{u_R}\right), \quad (15)$$

e

$$\delta = \delta_R + \alpha_R. \quad (16)$$

A força normal ao leme, em geral, é dada por

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_R^2 \sin \alpha_R, \quad (17)$$

na qual  $A_R$  é a área do leme,  $f_\alpha$  é o gradiente do coeficiente de sustentação (lift) do leme e é dado por

$$f_\alpha(\Lambda) = \frac{6,13\Lambda}{\Lambda + 2,25}, \quad (18)$$

na qual  $\Lambda$  é o aspecto do leme e

$$U_R^2 = v_r^2 + u_r^2. \quad (19)$$

Os componentes da velocidade sobre o leme dependem do jato de água gerado pelo propulsor à montante (YUBA, 2014). (YUBA, 2014) emprega a fórmula para o cálculo da velocidade longitudinal sobre o leme

$$u_R = u \left\{ 1 + K_R \left[ \left( 1 + \frac{8K_T}{\pi J^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}, \quad (20)$$

na qual  $u_p$  é a velocidade relativa do fluido na direção longitudinal na posição do propulsor e  $K_R$  o fator de correção devido à posição do propulsor e do leme, dado por

$$K_R = \frac{4x_p + 0,3D_p}{4x_p + 0,6D_p}, \quad (21)$$

com  $x_p$  sendo a distância entre o propulsor e o leme. A Tabela 1 mostra os dados a serem usados na simulação e que correspondem ao modelo reduzido da embarcação. Existem, para o caso de comboios efetuando uma manobra no lago de uma eclusa, dois componentes: ventos que atingem um comboio vazio, que é a situação mais crítica, ao invés de um comboio carregado e ondas geradas pelo vento.

Os ventos que afetam a dinâmica da embarcação podem ser descritos em termos da combinação de um termo que é a velocidade média e de um outro termo contendo termos oscilatórios de alta frequência. Existe na literatura uma variedade de abordagens destes espectros de ventos que pode ser vista, de forma simplificada em (FOSSSEN, 1994).

Grandeza	Valor
Área do leme (m <sup>2</sup> )	0,016
Diâmetro do hélice (m)	0,026
Número de lemes	2
Altura do leme (m) – $h_R$	0,03
Distância entre leme e propulsor (m) – $x_P$	0,0206
Coefficiente de redução na resistência sobre o leme – $t_R$	0,055
Parâmetro de interação entre leme e casco – $\alpha_H$	0,194
Razão do aspecto do leme – $\Lambda$	-0,427
Coefficiente de retificação do leme – $\gamma_R$	0,23

Tabela 1. Dados do sistema do leme do empurrador.

Fonte: Próprio autor.

A abordagem de Isherwood considera forças e momentos oriundos do vento com termos quadráticos da velocidade dados por

$$\begin{aligned}
 X_W &= \frac{1}{2} C_X(\gamma_R) \rho_W v_R^2 A_T, \\
 Y_W &= \frac{1}{2} C_Y(\gamma_R) \rho_W v_R^2 A_L, \\
 N_W &= \frac{1}{2} C_N(\gamma_R) \rho_W v_R^2 A_L L,
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

na qual  $C_X$ ,  $C_Y$  e  $C_N$  são constantes a serem determinadas experimentalmente,  $\rho_W$  é a densidade do ar,  $A_T$  é a área transversal do comboio e  $A_L$  é a área lateral do comboio e  $L$  é comprimento total do comboio. Em relação ao referencial inercial o ângulo do vento é  $\psi_w$  enquanto o ângulo da embarcação em relação ao referencial é  $\psi$ . Para a embarcação, o vento está na direção

$$\psi_R = \psi_w - \psi,
 \tag{23}$$

como mostra a Figura 1.

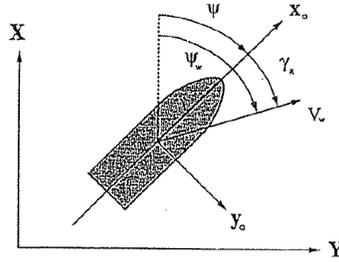


Figura 1. Definição da orientação da velocidade do vento.

Fonte: (FOSSEN, 1994).

A incidência de vento na embarcação produz dois efeitos, alterar os valores dos componentes da velocidade na direção  $X_0$  e  $Y_0$  e afetar a velocidade de rotação da embarcação. Uma vez que o comboio navega nos lagos das eclusas, será assumido que não há correnteza. Desta forma, os componentes da velocidade relativa  $v_R$  são

$$u_R = v_W \cos \gamma_R - u, \quad (24)$$

$$v_R = v_W \sin \gamma_R - v.$$

(PADOVEZI, 2003) verifica experimentalmente que  $C_x$ ,  $C_y$  e  $C_N$  são menores que 1. (OLIVEIRA, 2013) efetua medidas dos coeficientes  $C_y$  em um modelo reduzido obtendo resultados similares. Em vista do comportamento dos valores dos coeficientes, por meio de uma interpolação de dados, é possível afirmar que

$$\begin{aligned} C_x &= 0,0244\gamma_R^3 - 0,1141\gamma_R^2 + 0,0387\gamma_R + 0,1217, \\ C_y &= -0,4141\gamma_R^2 + 1,2711\gamma_R, \\ C_N &= -0,2871\gamma_R^3 + 1,5186\gamma_R^2 - 1,9442\gamma_R. \end{aligned} \quad (25)$$

Os dados das velocidades do vento podem ser extraídos dos projetos ONDISA 5 e ONDISA 8 (AMORIM; MENDONÇA; TROVATI, 2011; TROVATI *et al.*, 2011). Os dados de vento foram obtidos no reservatório de Ilha Solteira no período de 1970 a 1997 e que podem ser considerados na análise para outras eclusas. Há uma predominância de ventos nas direções Leste e Nordeste e a velocidade de 25 a 30 nós.

### 3 I RESULTADOS

Utilizamos para os estudos um modelo reduzido na escala 1:50, na qual a propulsão é feita com dois motores elétricos, operador por placa PWM e controlados por uma placa Arduino. O leme é acionado por servo motor. O sensor de posição é um acelerômetro de seis graus e uma câmera de vídeo.

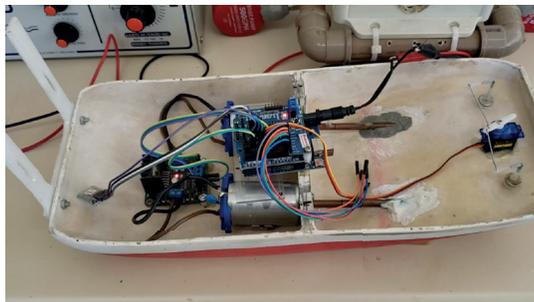


Figura 2. Visto do interior do empurrador com a placa Arduino UNO, dois propulsores acionados por motores elétricos e o leme, acionado por servo motor.

Fonte: (Autor).

Inicialmente efetuamos uma simulação numérica do comportamento do comboio, seguindo uma trajetória de aproximação à eclusa. Um controle PID foi utilizado atuando sobre os propulsores e no leme. Adotamos a velocidade máxima de ventos em uma dada direção. O código foi escrito no Octave, aplicativo gratuito. Uma trajetória foi desenhada (azul) e a resposta da trajetória está em vermelho.

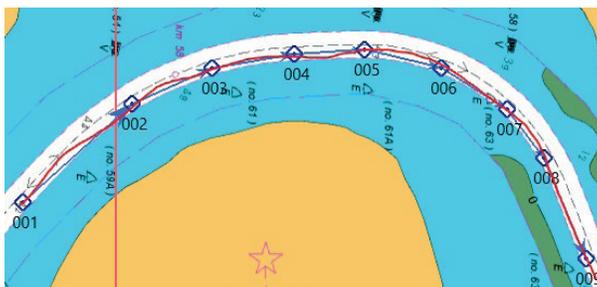


Figura 3. Análise da trajetória desejada (azul) e a simulada (vermelha) por meio da simulação numérica.

Fonte: (Autor).

As respostas mostram a influência do vento sobre o comboio. Destacamos que como a manobra se dá com velocidades bem baixas, a ação do vento acaba afetando o controle. O mesmo resultado foi obtido no modelo reduzido. Destacamos neste trabalho o desenvolvimento do modelo matemático, assim como dos parâmetros hidrodinâmicos, para o comboio no arranjo BP12, que é o arranjo empregado em manobras de aproximação da eclusa. O modelo reduzido foi construído e utilizado para a validação dos resultados obtidos na simulação. Observamos que os ventos afetam o sistema de manobra, que é

composto de dois propulsores e dois lemes. Utilizamos dois leds dispostos na entrada da eclusa e uma câmera de vídeo embarcada. A câmera permite identificar a distância que o comboio está da entrada da câmera assim como o posicionamento do comboio em relação à câmera.

Este sistema permite que mesmo em situações adversas, como neblina, o sistema identifique a posição do comboio em relação à entrada da eclusa. Tal sistema permite ao comandante visualizar as extremidades da eclusa e verificar a manobra de aproximação, sendo que estando em desacordo, um alarme soa visualmente na tela, permitindo correções na manobra. Esperamos que tais resultados tragam um melhor entendimento no comportamento do comboio neste tipo de manobra e que sistemas adicionais sejam implantados.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, A. E. A.; MENDONÇA, E. T.; TROVATI, L. R. Projeto ondisa5 : hidrovía tietê-paraná: alerta de vento e ondas para segurança da navegação. *In*: 2011, Buenos Aires, Ar. **IPIN**. Buenos Aires, Ar.: IPIN, 2011. p. 9.

AMORIM, A. E. A.; PADRONI, R. M.; LUKINE, S. Comboios Fluviais - uma análise de comportamento e manobra através de estímulos visuais no simulador. *In*: (A. V. Sáenz et al., Org.) 2017, Cidade do Panamá, Panamá. **COPINAVAL 2017**. Cidade do Panamá, Panamá: Springer Nature, 2017.

BRARD, R. Maneuvering of Ships In Deep Water , in Shallow Water , and in Canals. **Summer meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers**, [S. l.], p. 229–257, 1951.

FOSSEN, T. I. **Guidance and control of ocean vehicles**. West Sussex -- England: John Wiley & Sons, 1994. *E-book*.

IMLAY, F. **The complete expressions for added mass of a rigid body moving in an ideal fluid**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0263966>.

KING, K. K. *et al*. Maneuvering simulations of pusher-barge systems. **Journal of Marine Science and Technology**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 117–126, 2008 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00773-007-0267-4>

KING, K. K. *et al*. Maneuvering simulations of pusher-barge systems I . Permission to publish. **J Mar Sci Technol**, [S. l.], v. 13, n. April 2016, p. 14, 2008 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00773-007-0267-4>

KING, K. K.; YASUKAWA, H.; HIRATA, N. Shallow Water Effect on Turning Motion of a Pusher-Barge System. *In*: 2008, **4th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics**. [S. l.: s. n.] p. 1–4.

KOH, K. K.; YASUKAWA, H.; HIRATA, N. Hydrodynamic derivatives investigation of unconventionally arranged pusher-barge systems. **Journal of Marine Science and Technology**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 256–268, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00773-008-0004-7>

MATA, A. P. *et al.* **LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA**. Rio de Janeiro-RJ: [s. n.], 2017.

MILNE-THOMSON, L. M. **Theoretical Hydrodynamics**. 4th. ed. London, GBR: MacMillan & Co. Ltd., 1962. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/188087a0>

OLIVEIRA, B. M. **Software de Rastreamento de Embarcações e Plataforma Eletrônica para Ensaios Hidrodinâmicos em Túnel de Vento**. 2013. - UNESP, [s. l.], 2013.

OLIVEIRA, B. M. De; TROVATI, L. R. Rastreamento satelital de embarcações e modelagem hidrodinâmica para auxílio em operações de eclusagem . **Sistemas, Cibernética e Informática**, [S. l.], v. 8, p. 14–19, 2011.

PADOVEZI, C. D. **Conceito de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil**. 2003. - USP, [s. l.], 2003.

PADOVEZI, C. D. *et al.* **Manobrabilidade de comboios fluviais**. São Paulo-SP-BR: [s. n.], 2008.

PADOVEZI, C. D.; GANDARA, M. P. **ESTUDO DE MANOBRABILIDADE DE COMBOIOS FLUVIAIS UTILIZANDO MODELO EM SEMI-ESCALA**. São Paulo-SP-BR: [s. n.], 2009.

TROVATI, L. R. *et al.* **Projeto ONDISA 8 - Desenvolvimento de tecnologia para transposição de barragens e de instrumentação para segurança da navegação hidroviária**. Ilha Solteira, SP: [s. n.], 2011.

YUBA, D. G. T. **Análise de sistemas de propulsão e manobra alternativos para aumento da manobrabilidade de comboios fluviais**. 2014. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2014.

# CAPÍTULO 12

## DESENVOLVIMENTO DE UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR CAPTURA DE IMAGEM

*Data de aceite: 01/03/2021*

*Data de submissão: 15/01/2021*

### **Giovanni Luiz Fredo**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Pato Branco – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/5769459920768957>

### **Paulo Rogério Novak**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Pato Branco – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/7766888778491590>

**RESUMO:** Nas últimas décadas, houve um aumento significativo de pesquisas na área de técnicas de medição sem contato. A fotogrametria, que é uma dessas técnicas, tem recebido atenção especial devido a sua praticidade, já que necessita basicamente de uma câmera digital doméstica e um computador, e por sua capacidade de alcançar medições em toda uma estrutura. Este trabalho tem como objetivo comprovar o funcionamento de um código computacional desenvolvido no programa livre Scilab para análise de vibração por captura de imagem, utilizando como base a fotogrametria digital. Para isso, dois sistemas foram analisados. O primeiro consiste na captação do sinal de um pêndulo simples, comparando os resultados de frequência natural obtidos com um modelo teórico. O segundo consiste em um sistema mecânico de um grau de liberdade, do qual os resultados foram comparados com a resposta teórica alimentada a partir de dados obtidos

por um sensor convencional de medição, neste caso foi utilizado um acelerômetro. O cálculo dos deslocamentos foi efetuado pelo algoritmo Correlação de Imagem Digital. Para ambos os sistemas foi constatada uma boa concordância nos deslocamentos, assim como a estimativa de frequência natural de cada um, da qual foram registradas diferenças de até 2,63%.

**PALAVRAS - CHAVE:** Fotogrametria.

Acelerômetro. Deslocamentos. Frequência Natural.

### DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL CODE FOR VIBRATION ANALYSIS BY IMAGE CAPTURE

**ABSTRACT:** In the last decades, there has been a significant increase of researches in the área of non-contact measurement techniques. Photogrammetry, which is one of these techniques, has received special attention due to its practicality, as it requires basically one domestic digital camera and one computer, and due to its capability to achieve full-field measurement. The objective of this work is to verify the behavior of a computer code developed on the free software Scilab for vibration analysis by image capture, using as base the digital photogrammetry. For this, two systems were monitored. The first consists of the signal capture of a simple pendulum, comparing the achieved results of natural frequency with a theoretic model. The second one consists on a one degree of freedom mechanical system, which the achieved results were compared with the theoretic response fed with the data achieved from a conventional sensor of measurement, in

this case an accelerometer was used. The computation of the displacements was made by algorithm Digital Image Correlation. For both systems a good agreement was detected in the displacements, as well as the estimation of each natural frequency, which were registered differences until 2,63%.

**KEYWORDS:** Photogrammetry. Accelerometer. Displacements. Natural Frequency.

## 1 | INTRODUÇÃO

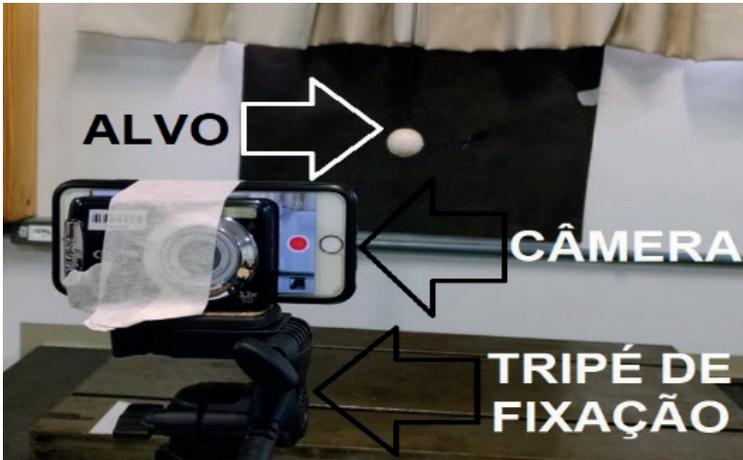
A necessidade de uma manutenção adequada e de qualidade na indústria vem aumentando com o passar do tempo. É nesse pensamento que se encaixa a ideia deste trabalho, já que a análise de vibração é uma das técnicas mais utilizadas na manutenção preditiva.

A análise por captura de imagem vem como uma alternativa de menor custo e mais simples quando comparada à métodos tradicionais de medição de vibração, como acelerômetros, já que não necessita de contato direto com a estrutura e para realiza-la necessita apenas de uma câmera digital comum e um computador.

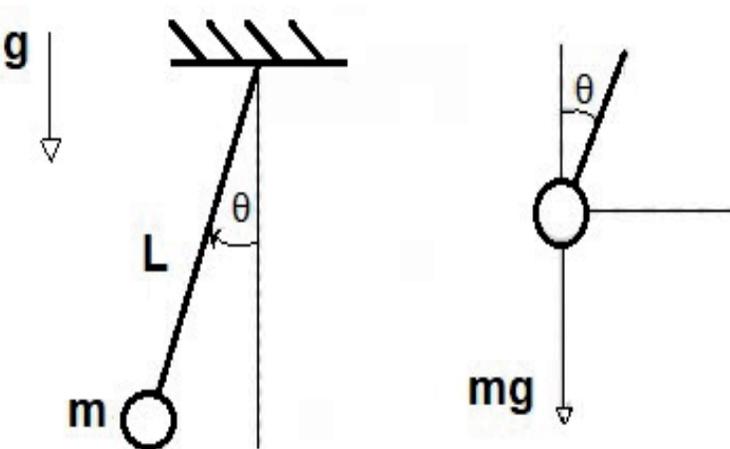
O objetivo deste trabalho é desenvolver um código computacional aplicado a análise de vibração por imagem utilizando a linguagem de programação do programa livre Scilab, assim como aplicar testes de comparação teórico experimental do processamento de imagem. Para os testes, dois sistemas foram analisados. O primeiro, a captação do sinal do pêndulo simples, comparando os resultados de frequência natural com um modelo teórico. O segundo, uma barra com uma mola acoplada, comparando os resultados obtidos com a resposta teórica alimentada a partir de um sensor tradicional de medição, um acelerômetro.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Para o primeiro teste, um pêndulo simples foi montado no Laboratório de Vibrações da UTFPR Campus Pato Branco. Na Figura 1, é mostrado o aparato experimental, assim como o esquema teórico do mesmo.



(a)



(b)

Figura 1 – Pêndulo simples: (a) aparato experimental; (b) modelo teórico.

Fonte: (a) autoria própria; (b) adaptada de Sotelo Jr. e França (2006).

O movimento do pêndulo pode se definir pelo ângulo  $\theta$  (RAO, 2009), sendo descrito por uma função seno. Supondo vibração livre, que a barra de comprimento  $L$  possua uma massa desprezível e que não há dissipação de energia, aplica-se a segunda lei de Newton para translação e rotação, do qual se chega a Equação Diferencial Ordinária (EDO) demonstrada pela Equação (1).

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{g}{L}\right) \text{sen}(\theta) = 0 \quad (1)$$

Considerando  $\theta \ll 1$ , faz-se a aproximação  $\text{sen}(\theta) \approx \theta$ . Portanto, substituindo na

Equação (1) e resolvendo a EDO, chega-se a Equação (2), que define a frequência natural do pêndulo simples ( $f$ ), dada em Hertz.

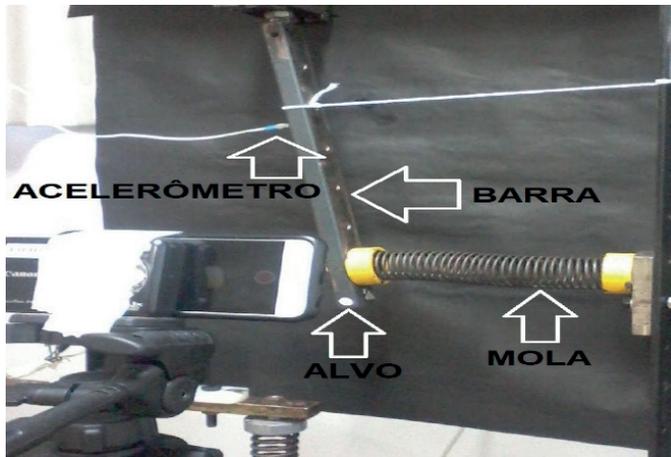
$$f = \sqrt{\frac{g}{L}} \frac{1}{2\pi} \quad (2)$$

Pela Equação (2), nota-se que a frequência natural depende apenas da aceleração da gravidade  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  e do comprimento conhecido  $L = 1,75 \text{ m}$ . Foram realizadas medições em duas distâncias  $\Delta x$  diferentes entre alvo (bola de sinuca) e a câmera digital (celular), sendo elas 60 cm e 1,5 m, com o pêndulo tendo excitação manual. Para cada distância, duas excitações iniciais foram feitas, uma com o ângulo  $\theta$  muito pequeno e outra com  $\theta$  maior.

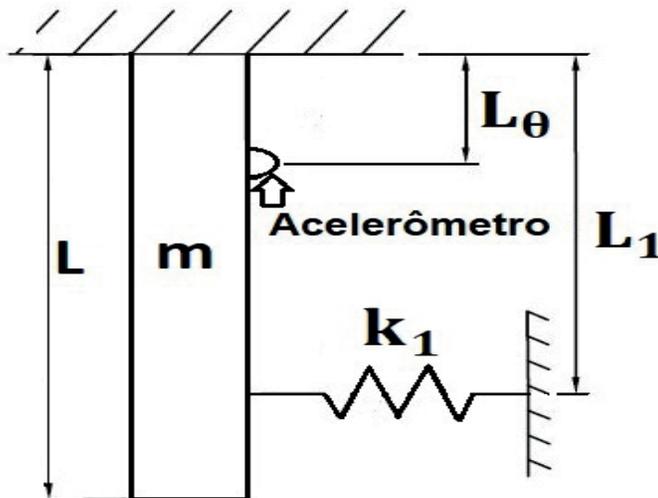
Para cada caso um vídeo de 45 segundos foi gravado pela câmera de um celular iPhone, com gravação a 30 frames por segundo (fps) e resolução de imagem 1920 x 1080 pixels. Ressalta-se que as frequências naturais devem estar abaixo de 10 Hz, pois a câmera grava a 30 fps, ou 30 Hz, e pelo critério de Nyquist, a frequência de vibração do sistema monitorado deve ser menor que a metade deste valor (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Todos os vídeos foram gravados com o flash da câmera ligado e as luzes apagadas. Para todos os casos, esperava-se uma frequência natural ( $f$ ) de aproximadamente 0,38 Hz. Para o desenvolvimento do código e processamento das imagens, foi utilizado um notebook de processador AMD A10-5745M APU com Radeon™ HD Graphics de 2,10 GHz e memória RAM instalada 8,00 GB, e o programa livre Scilab.

Para o segundo teste, uma barra rígida de comprimento  $L = 400 \text{ mm}$ , massa  $m = 1,693 \text{ kg}$ , foi posicionada na vertical conforme é mostrado na Figura 2, pinada em uma das pontas, com uma mola de rigidez  $k_1 = 309,25 \text{ N/m}$  a uma distância  $L_1 = 343 \text{ mm}$  da ponta superior e um acelerômetro a uma distância  $L_g = 160 \text{ mm}$ . O sistema foi colocado em movimento com excitação manual, monitorado com o acelerômetro e filmado ao mesmo tempo em duas situações: primeiro sem o uso do flash e luzes ligadas, e segundo com o uso do flash e luzes desligadas. Em ambos os casos a distância entre o alvo (barra) e a câmera foi de 50 cm e para cada situação um vídeo de 25 segundos foi gravado.



(a)



(b)

Figura 2 – Barra: (a) aparato experimental; (b) modelo teórico.

Fonte: autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 2, um alvo foi demarcado a uma distância  $L_0 = 382$  mm da ponta superior para a monitoria do movimento. Como no primeiro teste, um modelo teórico foi desenvolvido. Considerando o movimento da barra em vibração livre e que não há dissipação de energia no sistema, aplicou-se a segunda lei de Newton, do qual se chegou a EDO demonstrada pela Equação (3).

$$I_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + \left( (k_1 L_1^2) + \left( mg \frac{L}{2} \right) \right) \theta = 0 \quad (3)$$

Onde  $I_0$  é o momento de inércia da barra, dado pela Equação (4).

$$I_0 = \frac{mL^2}{3} \quad (4)$$

Supondo uma solução para a EDO do tipo  $\theta(t) = \theta \cos(\omega t - \varphi)$ , chega-se a conclusão que a frequência natural da barra ( $f$ ) em Hertz, é dada pela Equação (5).

$$f = \sqrt{\frac{(k_1 L_1^2) + (mg \frac{L}{2})}{I_0}} \frac{1}{2\pi} \quad (5)$$

Substituindo os valores mostrados na Equação (5), chega-se a uma frequência natural do modelo teórico de 3,34 Hz. Usando as condições de contorno: aceleração inicial ( $\alpha_0$ ) indicada pelo acelerômetro e partindo do repouso, ou seja, velocidade inicial ( $v_0$ ) igual a zero, obtém-se as constantes do modelo teórico, das quais o ângulo  $\varphi$  possui valor zero. Portanto, a solução é dada pela Equação (6).

$$\theta(t) = -\frac{\alpha_0}{\omega^2} \cos(\omega t) \quad (6)$$

Onde  $\omega$  é o valor da frequência natural dada em rad/s, ou seja,  $\omega = 2\pi f$ . Esta equação representa o movimento em qualquer ponto da barra. Como o interesse é analisar o deslocamento no alvo, multiplicamos a Equação (6) pela distância  $L_0$ . O valor de frequência natural detectado pelo acelerômetro foi  $f=3,005$  Hz, portanto  $\omega = 18,88$  rad/s para ambos os casos.

Para o caso sem flash, o valor obtido pelo acelerômetro ficou  $\alpha_0=4,08$  m/s<sup>2</sup>. Substituindo este e o valor de  $\omega$  na Equação (6), chega-se na Equação (7), a qual descreve o deslocamento teórico no alvo em milímetros para este caso.

$$\theta(t) = -27,33 \cos(18,88t) \quad (7)$$

Como o deslocamento detectado pelo código no Scilab nos dá um resultado em pixels, um ajuste foi feito para que ambas as curvas ficassem na mesma unidade. Para isso, a raiz do valor quadrático médio das curvas experimentais e teóricas foi calculado, uma razão entre estes foi efetuada e então multiplicada na curva experimental.

Após isto, uma Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) foi aplicada em ambas as curvas para chegar ao domínio da frequência do sistema.

Para o caso com o flash, o valor obtido foi  $\alpha_0=6,66$  m/s<sup>2</sup>. Seguindo os mesmos passos, chega-se na Equação (8), que demonstra o deslocamento para este caso.

$$\theta(t) = -44,60 \cos(18,88t) \quad (8)$$

### 3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3, 4 e 5 são mostrados os resultados do primeiro teste. O intervalo de tempo analisado foi de 0 a 8,0 segundos e o intervalo de frequência foi de 0 a 0,65 Hz. Nota-se pela Figura 3, que para pequenas oscilações a análise se mostrou ineficaz. Isso se deu pela ocorrência de uma sobreposição dos alvos devido a pequenas oscilações. Portanto não realizou-se o teste de pequenas oscilações para a outra distância. Pelos resultados, nota-se que a frequência natural ( $f$ ) se deu em torno de 0,37 Hz para todos os casos de maiores oscilações, o que é bem próximo ao valor teórico.

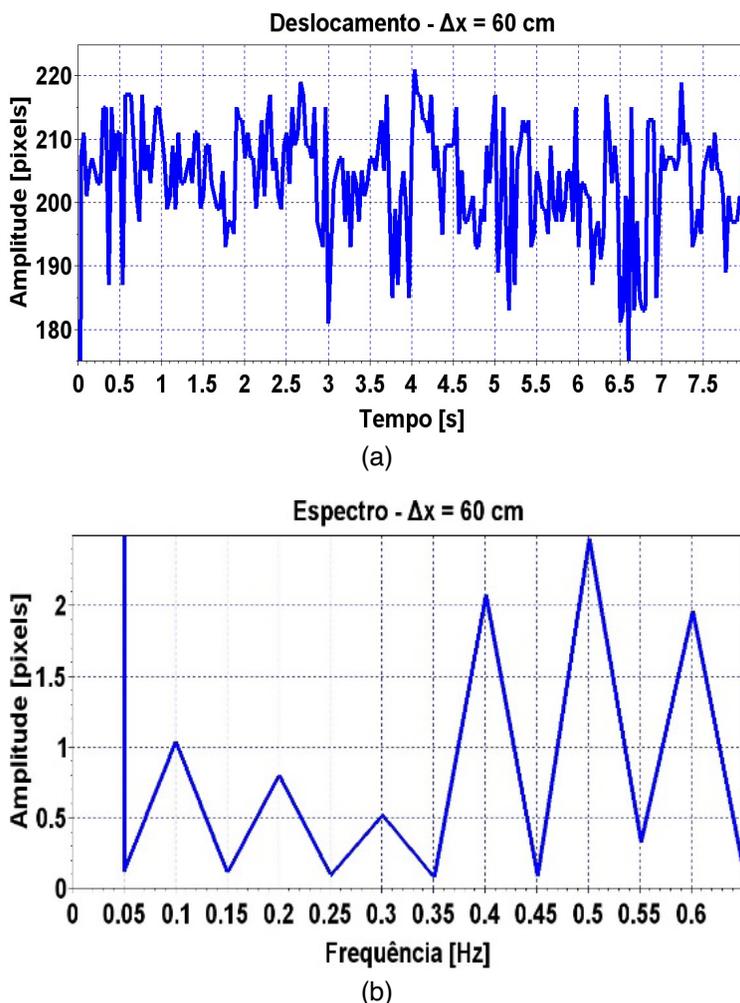
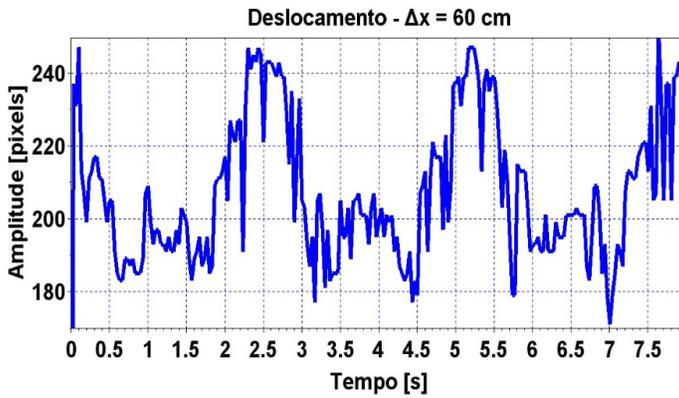
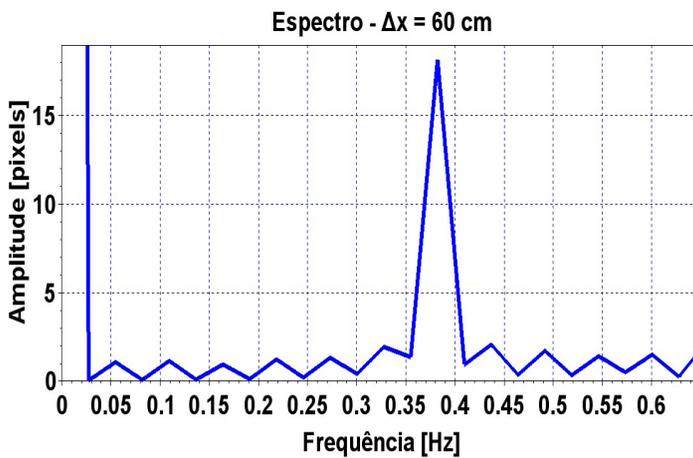


Figura 3 – Resultado para  $\theta$  muito pequenos: (a) no tempo; (b) na frequência.

Fonte: autoria própria



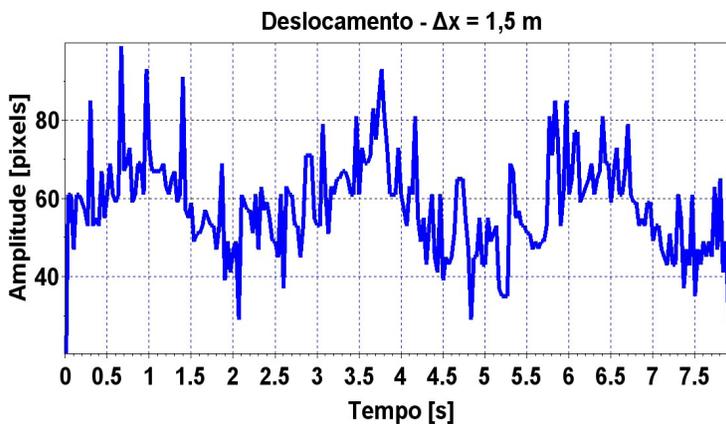
(a)



(b)

Figura 4 – Resultado para  $\theta$  maiores: (a) no tempo; (b) na frequência.

Fonte: autoria própria



(a)

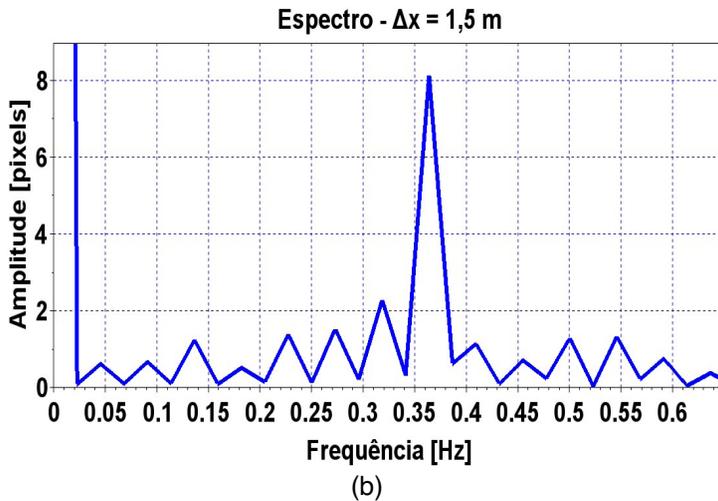
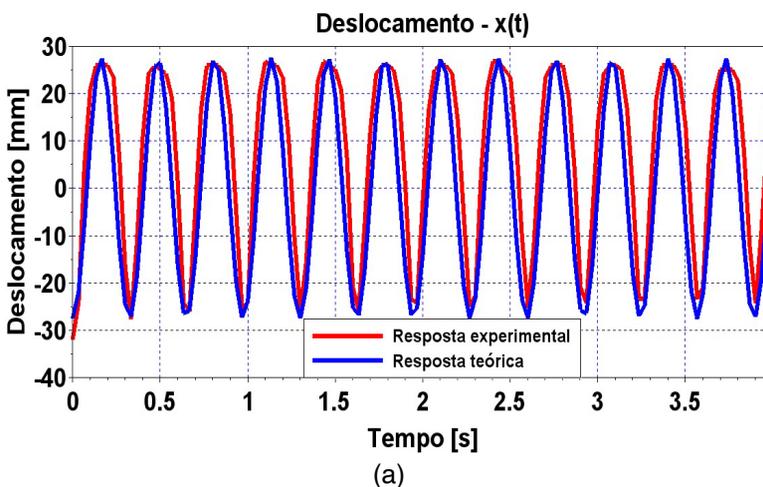


Figura 5 – Resultado para  $\theta$  maiores: (a) no tempo; (b) na frequência.

Fonte: autoria própria

Nas Figuras 6 e 7, são mostrados os resultados do segundo teste, comparando os resultados do modelo teórico com a resposta experimental obtida com o código. Neste caso, o intervalo de tempo analisado foi de 0 a 4 segundos e o de frequência foi de 0 a 6,0 Hz. Pelos resultados, nota-se que para ambos os casos a comparação teórico experimental do processamento de imagem possui concordância, principalmente quando observado o domínio da frequência, do qual a frequência natural ( $f$ ) se deu em torno de 3,2 Hz.

A diferença para o valor calculado analiticamente se deve ao fato de o sistema ter sido considerado vibração livre, quando na verdade ocorreu um amortecimento.



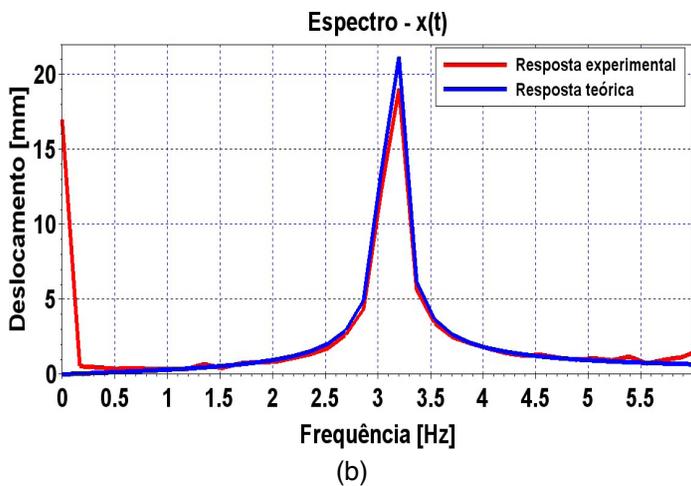


Figura 6 – Resultado caso sem flash: (a) no tempo; (b) na frequência.

Fonte: autoria própria

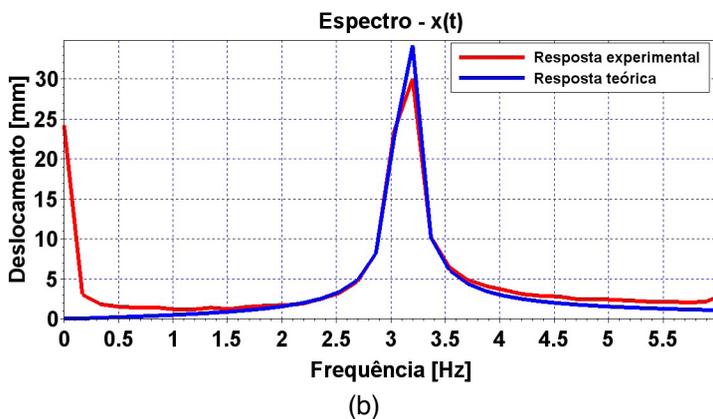
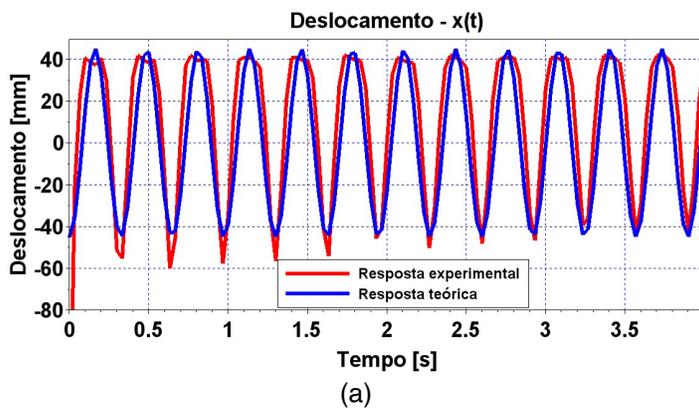


Figura 7 – Resultado caso com flash: (a) no tempo; (b) na frequência.

Fonte: autoria própria

## 4 | CONCLUSÃO

Com o primeiro teste, é possível afirmar que para oscilações muito pequenas este código não foi eficaz. Já para oscilações maiores, o mesmo mostrou-se consistente, chegando a 2,63% de diferença teórico experimental para frequência natural.

Com o segundo teste, conclui-se que o sinal sem flash se comportou de forma mais consistente do que o com flash, porém ambos os resultados de frequência natural foram satisfatórios, com até 0,63% de diferença teórico experimental.

## REFERÊNCIAS

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. Análise de Imagens Digitais. **Princípios, Algoritmos e Aplicações**, São Paulo, 2008. Thomson.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**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 dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**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.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acelerômetro 122, 127, 131, 132, 134, 136

Aquecimento 9, 10, 11, 35, 48, 49, 56, 70, 71

### B

Baja 22, 23, 24, 26, 32, 33

Balance 22, 23, 27, 28, 29, 30, 99

Beneficiamento 80, 106, 108, 109, 110, 116, 117

Bombas 13, 34, 37, 39, 43, 47

Braço robótico 100, 101, 104, 105

### C

Características físicas 1

Carro 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56

Casca de arroz 57, 58

Ciclo de vida 95

Colagem 1, 2, 4, 5, 7, 8, 92, 93

### D

Deslamagem 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 116, 117, 118

Deslocamentos 131

### E

Efeito estufa 49, 57

Energia elétrica 34, 36, 37, 40

Energia mecânica 34, 36, 37, 38, 40

Energia potencial 34, 36, 37

### F

Flotação 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119

Fotogrametria 131

Freios 22, 23, 24, 25, 27

Frequência natural 131, 132, 134, 136, 137, 139, 141

## **H**

Hidrovia 120, 121, 124, 129

## **I**

Interface háptica 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 97, 98

## **L**

Leito fluidizado 57, 58

## **M**

Métodos de secagens 65

Mistura 57, 58, 116

Moagem 106, 108, 109, 110, 111, 112, 117, 118, 119

## **N**

Nióbio 106, 107, 108, 109, 110, 113, 115, 118, 119

## **O**

Off road 22, 23

## **P**

Painel compensado 1, 2

Película térmica 48, 49, 55

## **R**

Resina poliuretana 1, 2, 3, 7

## **S**

Secadores 65, 72, 74, 75

Segurança da navegação 120, 129, 130

Sensor de cor 100, 101, 102, 104

Separação 100, 104, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 117, 118

## **T**

Temperatura 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 14, 17, 19, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 75, 107

Termorretificação 1, 2, 4, 5, 7, 8

Teste controle 81

Turbinas 14, 34, 38

## **U**

Umidade 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 73, 74, 75

## **V**

Variação 22, 23, 26, 27, 68, 104

Velocidade 18, 35, 38, 39, 45, 50, 57, 58, 64, 68, 69, 70, 85, 89, 103, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 136

# Engenharia Mecânica:

A Influência de Máquinas, Ferramentas  
e Motores no Cotidiano do Homem

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

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

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

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

 **Atena**  
Editora

Ano 2021

# Engenharia Mecânica:

A Influência de Máquinas, Ferramentas  
e Motores no Cotidiano do Homem

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

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

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

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

 **Atena**  
Editora

Ano 2021