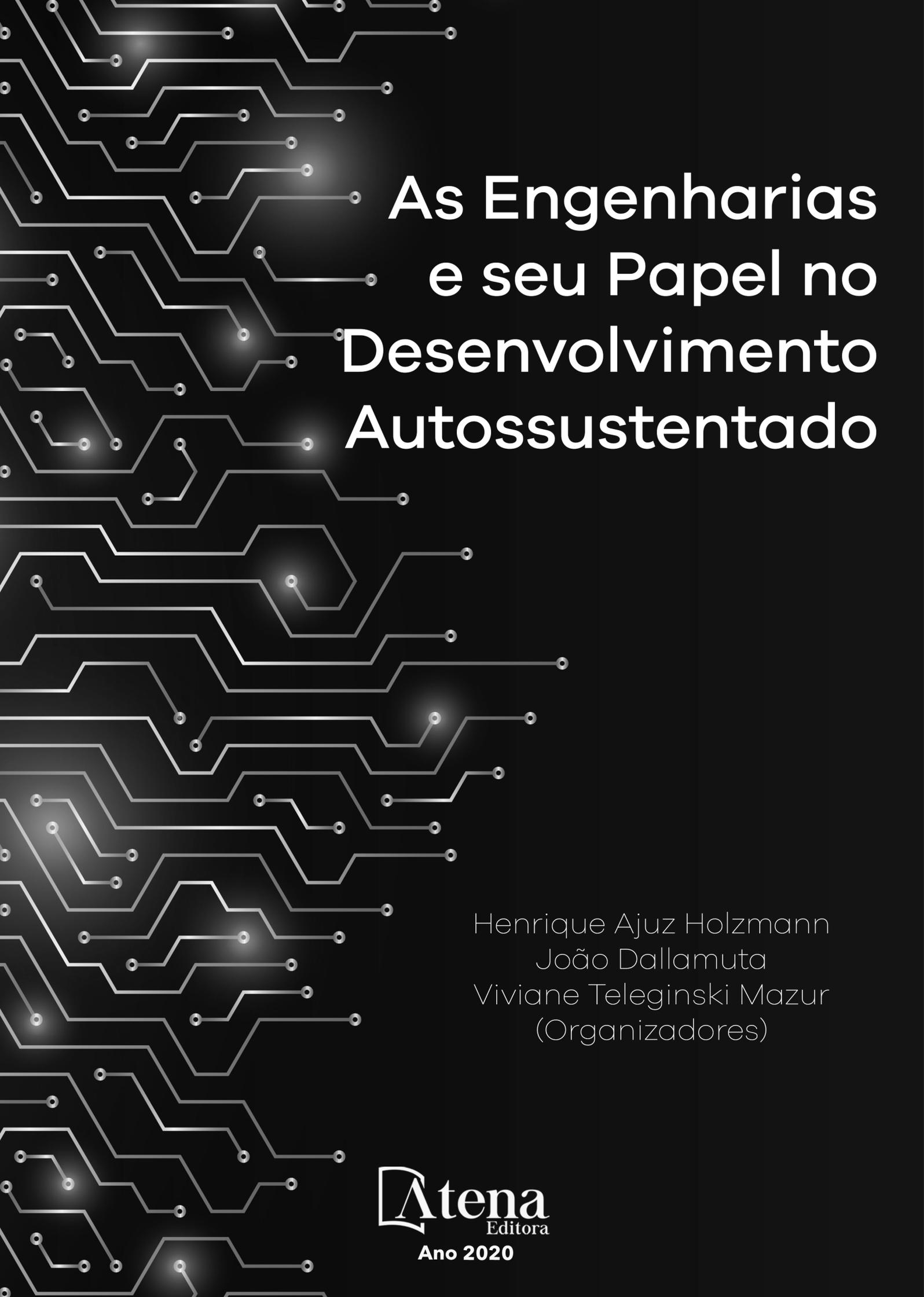


As Engenharias e seu Papel no Desenvolvimento Autossustentado

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
Viviane Teleginski Mazur
(Organizadores)

**Atena**
Editora
Ano 2020



As Engenharias e seu Papel no Desenvolvimento Autossustentado

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
Viviane Teleginski Mazur
(Organizadores)

**Atena**
Editora
Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Lorena Prestes

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

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

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

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. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª 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. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Fernando José Guedes da Silva Júnior – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a 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^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

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. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^a Dr^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^a Dr^a Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof^a Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof^a Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof^a Dr^a Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof^a Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Prof^a Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof^a Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof^a Dr^a Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
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
Prof^a Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof^a Ma. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
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 Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
 Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
 Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
 Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Me. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
 Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
 Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
 Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
 Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
 Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
 Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
 Prof. Me. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	<p>As engenharias e seu papel no desenvolvimento autossustentado [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta, Viviane Teleginski Mazur. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5706-926-4 DOI 10.22533/at.ed.466203001</p> <p>1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João. III. Mazur, Viviane Teleginski.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias e seu Papel no Desenvolvimento Autossustentado Vol. 1 e 2 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 24 capítulos, com assuntos voltados a engenharia elétrica, materiais e mecânica e sua interação com o meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 27 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, da construção civil com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção de baixo com baixo impacto ambiental.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões sobre temas atuais nas engenharias, de maneira aplicada as novas tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura!

Henrique Ajuz Holzmann

João Dallamuta

Viviane Teleginski Mazur

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE INFRAESTRUTURA E DEMANDA ENERGÉTICA PARA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL	
Mailson Gonçalves Morais Gian Lucas Martins Vagner Silva Guilherme DOI 10.22533/at.ed.4662030011	
CAPÍTULO 2	14
ELETRODEPOSIÇÃO DE SEMICONDUTORES PARA APLICAÇÃO EM ENERGIA RENOVÁVEL	
Victor Rocha Grecco DOI 10.22533/at.ed.4662030012	
CAPÍTULO 3	28
INVESTIGAÇÃO DAS GRANDEZAS QUE IMPACTAM NA VIDA ÚTIL DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	
Giancarlo de França Aguiar Bárbara de Cássia Xavier Cassins Aguiar DOI 10.22533/at.ed.4662030013	
CAPÍTULO 4	40
NOVA ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE DATACENTERS - O ÍNDICE EUED (ENERGY USAGE EFFECTIVENESS DESIGN)	
Alexandre Fernandes Santos Pedro Dinis Gaspar Heraldo José Lopes de Souza DOI 10.22533/at.ed.4662030014	
CAPÍTULO 5	58
MÓDULO DE SENSORIAMENTO INERCIAL APLICADO À CAPTURA DE MOVIMENTO DA MARCHA NA PARALISIA CEREBRAL	
Lucas Novaki Ribeiro Rafael Traldi Moura DOI 10.22533/at.ed.4662030015	
CAPÍTULO 6	67
CALCULANDO SENSORES LAMBDA, TPS E MAP COM EXATIDÃO MÁXIMA	
Robson Eduardo dos Anjos Schneider Aline Brum Loreto Eduardo Rorato Guarienti Matheus Brondani de Vargas DOI 10.22533/at.ed.4662030016	
CAPÍTULO 7	78
CÁLCULO VIA DISCRETIZAÇÃO DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DE FIGURAS PLANAS	
Arthur Coutinho de Araújo Pereira Pedro Henrique Tomaz Fernandes Carlos Antônio Taurino de Lucena Ângelo Vieira Mendonça DOI 10.22533/at.ed.4662030017	

CAPÍTULO 8	95
UTILIZANDO A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER NA IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO NÃO LINEAR EM SISTEMAS DINÂMICOS	
Marcelo Henrique Belonsi Maria Francisca da Cunha Manoel Moraes Junqueira DOI 10.22533/at.ed.4662030018	
CAPÍTULO 9	103
DIMENSIONAMENTO DE PISTÃO MAGNETO REOLÓGICO UTILIZANDO ANÁLISE NUMÉRICA	
Lays Cristina Gama Lopes Luiz Fernando Cótica Ivair Aparecido dos Santos DOI 10.22533/at.ed.4662030019	
CAPÍTULO 10	119
SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA UM SISTEMA MASSA-MOLA-AMORTECEDOR DE UM GRAU DE LIBERDADE	
Isabela Kimie Ota Daniel Almeida Colombo DOI 10.22533/at.ed.46620300110	
CAPÍTULO 11	124
AVALIAÇÃO DO USO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS COMO DISPOSITIVO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	
Marco Antonio Rodrigues de Brito Marcus Costa de Araújo DOI 10.22533/at.ed.46620300111	
CAPÍTULO 12	141
VARIAÇÃO DA ALCALINIDADE DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO COM BIODIESEL	
Elba Gomes dos Santos Leal Rui Carlos de Sousa Mota Ricardo Guilherme Kuentzer Bento Pereira da Costa Neto Danilo Matos Moura DOI 10.22533/at.ed.46620300112	
CAPÍTULO 13	154
COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DO SEGMENTO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	
Mauro Donizeti Berni Paulo Cesar Manduca DOI 10.22533/at.ed.46620300113	
CAPÍTULO 14	162
DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO EM BORDA DE COMPÓSITOS	
João Pedro Inácio Varela Joseph Bruno Rodrigues Almeida Wanderley Ferreira de Amorim Júnior DOI 10.22533/at.ed.46620300114	

CAPÍTULO 15 176

PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADORES UTILIZANDO CINZAS RESIDUAIS

Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante

Aline Domingues Gomes

Lucas de Souza Borban

Jean César Marinozi Vicentini

DOI 10.22533/at.ed.46620300115

CAPÍTULO 16 191

EFEITO DA GRANULOMETRIA DA FIBRA DE COCO VERDE NA ADSORÇÃO DE COMPOSTOS PROVENIENTES DO PETRÓLEO

Isadora Barreto Coutinho

Inês Aparecida Santana

Antonia Miwa Iguti

DOI 10.22533/at.ed.46620300116

CAPÍTULO 17 203

APLICABILIDADE DE NANOCOMPÓSITOS A BASE DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS

Anne Caroline da Silva Rocha

Livia Rodrigues de Menezes

Emerson Oliveira da Silva

DOI 10.22533/at.ed.46620300117

CAPÍTULO 18 212

DEGRADAÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO POR NB_2O_5 SUPORTADO EM SiO_2

Thais Delazare

Rodrigo da Silva Neu

Emerson Schwingel Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.46620300118

CAPÍTULO 19 221

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE $BA_xSR_{1-x}CO_yFE_{1-y}O_{3+\Delta}$ PARA PREPARAÇÃO DE CAMADA FUNCIONAL DO ELETRODO CATÓDICO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO IT-SOFC

Mariana Lima

Everton Bonturim

Marco Andreoli

Nelson Batista de Lima

Emília Satoshi Miyamaru Seo

DOI 10.22533/at.ed.46620300119

CAPÍTULO 20 231

ESTUDO DA FIBRA DA URTIGA E DO ALGODÃO COLORIDO ORGÂNICO: DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA O VESTUÁRIO POR MEIO DO CRUZAMENTO DE FIBRAS

Giulia Mendonça Tenorio de Alburquerque

Ronaldo Salvador Vasques

Fabício de Souza Fortunato

Camila Pereira

DOI 10.22533/at.ed.46620300120

CAPÍTULO 21	239
ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ACESSÓRIOS VOLTADOS PARA O VESTUÁRIO UTILIZANDO COMO MATÉRIA-PRIMA O COURO DE KOMBUCHA	
<ul style="list-style-type: none"> Caroline Schuch Klein Ana Beatriz Pires da Silva Ronaldo Salvador Vasques Luciane do Prado Carneiro Fabício de Souza Fortunato 	
DOI 10.22533/at.ed.46620300121	
CAPÍTULO 22	247
PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICADO AO PRÉ-TRATAMENTO DA BATATA DOCE COM ÁCIDO CÍTRICO E À SECAGEM PARA AVALIAÇÃO DA COR	
<ul style="list-style-type: none"> Tamires Barlati Vieira da Silva Ana Paula da Silva Sbrunhera Priscila Dayane de Freitas Santos Thaysa Fernandes Moya Moreira Anielle de Oliveira Fernanda Vitória Leimann Bogdan Demczuk Junior 	
DOI 10.22533/at.ed.46620300122	
CAPÍTULO 23	259
CARACTERIZAÇÃO DE MEL E HIDROMEL ATRAVÉS DE CROMATOGRAFIA LÍQUIDA DE ALTA EFICIÊNCIA	
<ul style="list-style-type: none"> Marcello Lima Bertuci Lígia Boarin Alcalde Silvia Maria Martelli Évelin Marinho de Oliveira Angela Dulce Cavenaghi Altemio 	
DOI 10.22533/at.ed.46620300123	
CAPÍTULO 24	265
ESTUDO DA PRODUÇÃO DE PRODUTOS DE EXTRATOS ALCOÓLICOS CONCENTRADOS E DE ÁLCOOL GEL A PARTIR DE DESCARTES DE BEBIDAS ALCOÓLICAS	
<ul style="list-style-type: none"> Pierre Correa Martins Gabriel Alexandre Clemente Amaral Pedro Passador Bittencourt de Sá João Alves de Medeiros Neto Heloísa Barbosa de Oliveira Lara Patrício Ferreira Daniel Felipe Lima Soares Nilmara Beatriz Sousa de Oliveira Raquel de Medeiros Barreto Thayze Rodrigues Bezerra Pessoa Joselma Araújo de Amorim Vital de Souza Queiróz 	
DOI 10.22533/at.ed.46620300124	
SOBRE OS ORGANIZADORES.....	279
ÍNDICE REMISSIVO	280

ANÁLISE DE INFRAESTRUTURA E DEMANDA ENERGÉTICA PARA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Data de aceite: 19/06/2020

Data de submissão: 10/04/2020

Mailson Gonçalves Morais

UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda - RJ.

Gian Lucas Martins

UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda - RJ.

Vagner Silva Guilherme

UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda - RJ.

<http://lattes.cnpq.br/0350384043119359>

RESUMO: Atualmente, há grande preocupação com as mudanças climáticas e o aquecimento global, resultando na formulação e adoção do Acordo de Paris (COP – 21) aprovado em 12 de dezembro de 2015. Este compromisso foi centralizado em reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, onde, grande parte é proveniente da queima de combustíveis fósseis. Em resposta a esse cenário, fabricantes de veículos automotores, têm direcionado esforços em pesquisas e desenvolvimento alinhado ao avanço tecnológico da Engenharia Elétrica e Eletrônica, optando por certos veículos elétricos. Diversos países consolidaram esses tipos de automóveis em suas frotas

e estabeleceram metas para reduzir a fabricação de veículos com propulsão à motores de combustão interna, porém, alguns países demorarão um pouco mais para se adequarem as novas tecnologias, devido as necessidades de incentivos e investimentos públicos-privados em infraestrutura de recarga e demanda energética, assim como o Brasil. Fundamentado no que foi exposto, o presente trabalho busca compreender que, para a efetiva inserção dos veículos elétricos no setor de transportes brasileiro são necessários recursos que viabilizem infraestrutura de recarga indispensável para as baterias através de estações de carregamento pública e privada que acompanhem e atendam o crescimento da frota. A pesquisa apresenta uma simulação do impacto energético, baseada em projeções da atual frota de automóveis circulantes no país, relacionando dados obtidos da montadora do automóvel elétrico mais vendido do mundo, o Nissan Leaf. Com o progresso da concentração de veículos plug-in, haverá um aumento no consumo de energia do país, necessitando buscar alternativas que auxiliem o sistema energético brasileiro com geração de energia através de fontes renováveis e consumo inteligente, carregando as baterias nos horários de baixa demanda e

descarregando-as nos horários de pico. Recentemente, obtém-se uma boa aceitação aos veículos híbridos, principal caminho para transição dos veículos convencionais à combustão interna para os totalmente elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Veículo Elétrico. Infraestrutura. Demanda Energética.

ANALYSIS OF INFRASTRUCTURE AND ENERGY DEMAND FOR INSERTION OF ELECTRIC VEHICLES IN BRAZIL

ABSTRACT: Currently, there is great concern about climate change and global warming resulting in the formulation and adoption of the Paris Agreement (COP - 21) approved on December 12, 2015. This commitment was centered on reducing the emission of pollutants into the atmosphere, where much of it comes from the burning of fossil fuels. In response to this scenario, motor vehicle manufacturers have been directing research and development efforts in line with the technological advance of Electrical and Electronic Engineering, opting for certain electric vehicles. Several countries have consolidated these types of automobiles in their fleets and set targets to reduce the manufacturing of vehicles propelled by internal combustion engines, but some countries will take a little longer to adapt the new technologies due to the necessity for incentives and public-private investments in recharging infrastructure and energy demand, as will Brazil. Based on what has been exposed, the present work seeks to understand that, for the effective insertion of electric vehicles in the Brazilian transport sector, resources are needed to enable the indispensable recharging infrastructure for batteries through public and private charging stations that accompany and answer the growth of the fleet. The research presents a simulation of the energy impact, based on projections of the current fleet of cars circulating in the country, relating data obtained from the manufacturer of the world's best selling electric car, the Nissan Leaf. With the progress in the concentration of plug-in vehicles, there will be an increase in the country's energy consumption, needing to seek alternatives that help the Brazilian energy system with energy generation through renewable sources and intelligent consumption, charging the batteries at low demand times and discharging them at peak times. Recently, a good acceptance of hybrid vehicles has been obtained, the main path for the transition from conventional vehicles to internal combustion to fully electric ones.

KEYWORDS: Electric Vehicle. Infrastructure. Energy Demand.

1 | INTRODUÇÃO

Ao final do século XX, diversas discussões relacionadas à crescente da poluição do ar e das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) passaram a destacar a incineração de combustíveis fósseis provenientes do setor de transportes como uma das principais causas, isso levou grande parte dos países a adotar leis que impõe restrições as emissões e a elaborar sistemas de fiscalização veicular. Apreensivos com o aquecimento global e com as mudanças climáticas no planeta, diversos países aderiram ao Acordo de Paris (COP – 21) aprovado em 12 de dezembro de 2015. A proposta que traz o Acordo de Paris é: apresentar que o mundo está apto a modificar sua forma de geração e consumo de energia, investindo

em fontes renováveis, gerando e consumindo de forma mais sustentável, colaborando com o meio ambiente. Com este intuito, a descarbonização do setor de transportes se faz extremamente importante para se atingir esse objetivo (BARASSA, 2015).

No Brasil, atualmente a frota é composta em sua maioria, por veículos convencionais que utilizam como combustíveis o Etanol, a Gasolina, o Diesel e o Gás Natural, entretanto já se encontram em circulação pequenos veículos elétricos urbanos, ônibus e veículos utilitários. Diversas montadoras estão se aperfeiçoando e estudando novas possibilidades de motores elétricos, bem como tornar os já existentes mais eficientes e com desempenho elevado. Porém para a realidade brasileira atual, se torna mais viável por exemplo, a fabricação de Veículos Híbridos (HEV), ou seja, um motor a combustão interna que auxilia o motor elétrico, uma vez que o Brasil oferece pouca infraestrutura para uma frota de veículos elétricos com poucos eletropostos destinados a recarga das baterias, e sendo um país de dimensões continentais, a possibilidade de um motorista vir a sofrer pane seca devido à falta de energia da bateria é alta (BARASSA, 2015).

2 | IMPACTO ENERGÉTICO COM A INSERÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO NA FROTA NACIONAL

Atualmente há cerca de 2 milhões de Veículos Elétricos (VEs) circulando em todo o mundo e segundo a IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia) estima-se que esse número subirá para 125 milhões até 2030, isso empurrado principalmente por países da Ásia, Europa e América do Norte onde inclusive já existem metas para banir de vez os Motores a Combustão Interna (MCIs).

No Brasil essa realidade está bem mais distante uma vez que faz-se necessários diversos esforços, investimentos e preparação para se absorver de forma adequada esses veículos, porém, aos poucos o Brasil vem entrando na nova tendência mundial de eletrificação das frotas de veículos, já é possível encontrar alguns VEs circulando por cidades brasileiras de fato grande parte são híbridos, o que já sinaliza um possível crescimento na utilização desses veículos no futuro assim também como os totalmente elétricos. Isso se dá principalmente a investimento por empresas público-privadas que vem direcionando esforços na implantação de infraestrutura de recarga, um dos principais fatores para disseminação dos VEs (ABVE, 2018).

Segundo dados disponibilizados pelo anuário 2018 da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), a frota de veículos híbridos e totalmente elétricos no Brasil vem apresentando um crescimento considerável, a partir do ano de 2006 houveram os primeiros licenciamentos de veículos novos no país, e desde então, obteve um aumento significativo, e ao final do ano de 2017 alcançou um total de 6962 veículos. O gráfico 1 apresenta o número de licenciamentos por ano, de 2006 a 2017:

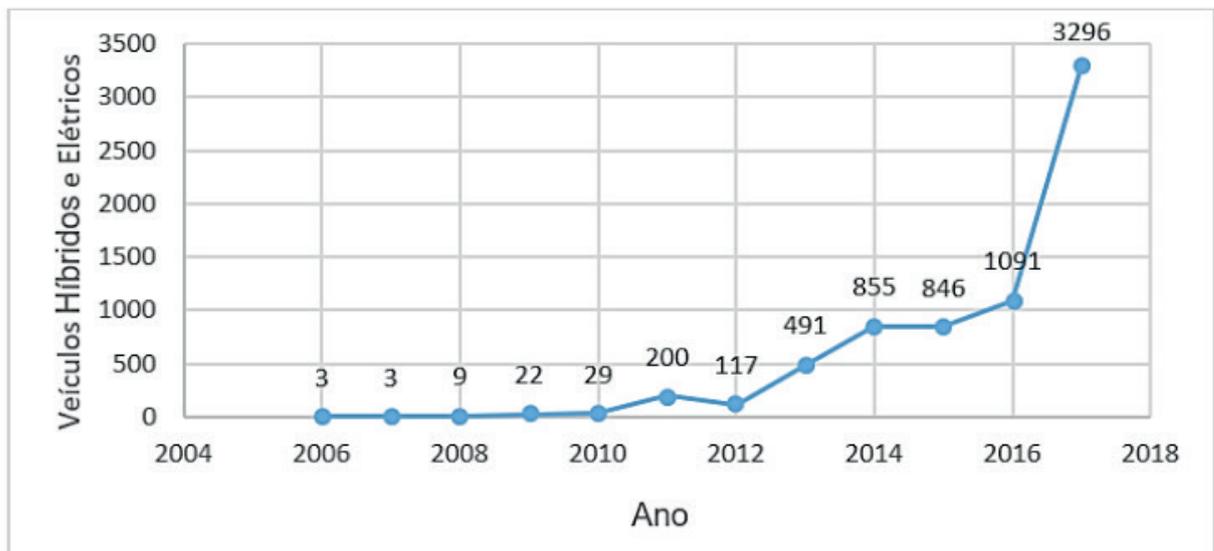


Gráfico 1 - Licenciamento de Veículos Híbridos e Elétricos por ano no Brasil

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de ANFAVEA (2018)

A evolução apresentada pelo gráfico 1 indica que o número de licenciamentos desses veículos apresentou um crescimento médio de 81,4% ao ano, durante os últimos cinco anos. Se hipoteticamente este percentual médio de crescimento se mantivesse até 2031, chegaríamos incrivelmente a uma frota de 28.935.859 veículos híbridos e totalmente elétricos.

2.1 Demanda Energética Nacional

Durante as diferentes horas do dia a demanda de energia sofre variações, alcançando os maiores valores entre as 18 e 21 horas o que é chamado de horário de ponta (três horas consecutivas de maior demanda). Por outro lado durante a madrugada, o consumo de energia é mínimo, neste horário uma grande parcela dessa energia gerada não é consumida e não é possível armazená-la em grandes quantidades. O gráfico 2 mostra a curva de carga média do Brasil obtida no ano de 2017 através de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), levando em consideração o valor médio de demanda solicitada ao sistema por todas as unidades consumidoras durante as horas do dia.

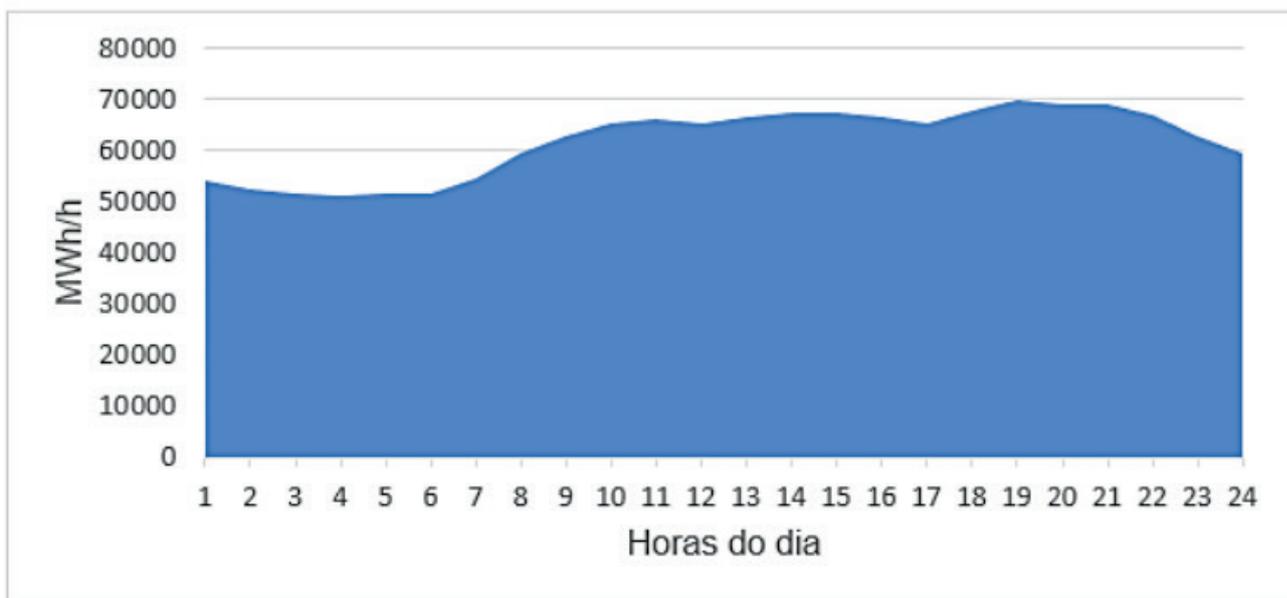


Gráfico 2 - Curva de Carga Média do Brasil em 2017

Fonte: Adaptado pelos autores a partir de ONS (2018)

Segundo informações do boletim de monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro do mês de dezembro fornecido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o consumo de energia elétrica total no Brasil acumulado durante os 12 meses do ano de 2017 foi de 577,9TWh, conforme apresenta a tabela 1

	Acumulado Durante 12 meses		
	Jan/16 – Dez/16 (GWh)	Jan/17 – Dez/17 (GWh)	Evolução
Residencial	132.893	133.904	0,8%
Industrial	164.253	165.883	1,0%
Comercial	88.185	88.129	-0,1%
Rural	26.795	27.903	4,1%
Demais Classes	48.253	48.128	-0,3%
Perdas e Diferenças	111.251	114.019	2,5%
Total	571.630	577.968	1,1%

Tabela 1 - Consumo total de energia elétrica Brasil em 2017

Fonte: Adaptada pelos autores a partir de MME (2018)

2.2 Demanda Energética dos VEs

Através dos dados obtidos de consumo de demanda, torna-se possível o desenvolvimento de um modelo capaz de estimar em quantos por cento o consumo de energia do país irá aumentar, mediante o crescimento da frota de carros elétricos plug-in.

De acordo com dados obtidos do Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2018 fornecido pela ANFAVEA, a frota de carros circulantes no Brasil no ano de 2017 era de 36.189.608. Sendo assim, faremos uma exemplificação capaz de ilustrar o quanto aproximadamente a penetração dos VEs irá impactar no consumo de energia do país.

Para fins de simulação, foram adotados os dados disponibilizados pela montadora do Nissan Leaf, atualmente o VE mais vendido do mundo.

Considerando que esses automóveis percorram 10.000 km por ano, baseado em intervalos de revisão adotado pela Montadora Nissan, com desempenho médio de 6,75 Km/KWh, obtêm-se os seguintes valores de consumo de energia elétrica apresentados na tabela 2.

Frota Atual (%)	Frota Automoveis (10 ³)	Distância Média Anual Percorrida (Km)	Desempenho Médio (Km/KWh)	Energia (GWh)	Brasil (%)
10	3.619	10.000	6,75	5,36	0,00093
20	7.238	10.000	6,75	10,72	0,00187
30	10.856	10.000	6,75	16,08	0,00278
50	18.095	10.000	6,75	26,81	0,00464
70	25.332	10.000	6,75	37,53	0,00649
100	36.189	10.000	6,75	53,61	0,00928

Tabela 2 - Consumo de Energia Anual dos VEs

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de Borba (2012)

A tabela 2 acima pode ser compreendida pela equação 1.

$$C = (F \cdot D) / DE \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

C - Representa o consumo final total da frota de veículos durante o ano;

- F - É a frota de automóveis de acordo com cada porcentagem adotada;
- D - É a distância média percorrida pelos veículos durante o ano de 2017;
- DE - É o desempenho energético médio da frota em km/Kwh no ano de 2017.

Conforme os resultados obtidos nesta exemplificação, podemos observar que uma frota composta de 100% de seus automóveis sendo elétricos do tipo plug-in, haverá um aumento de 0,00928% anual no consumo de energia elétrica do país, equivalente a menos de 1%. Ressaltando que para esta análise foi incluída apenas a frota de carros, para que fosse possível padronizar um desempenho médio. O aumento do consumo de energia elétrica refletirá diretamente na demanda nacional de acordo com os horários de carregamento das baterias dos VEs.

Um Teste-piloto realizado pelo Laboratório Nacional de Idaho (*Idaho National Laboratory – INL*) confirma, em grande parte, a noção de que, na ausência de infraestrutura pública para recarga, o proprietário do veículo tende a carregá-lo após a última viagem realizada, evidenciando que enquanto a condução se concentra ao longo do dia, a carga é realizada no período da noite, sendo assim, realizada nas residências (BORBA, 2012).

Com base no Perfil de Recarga e Utilização obtido no Teste-Piloto realizado, adotamos para fins de exemplificação um percentual de veículos que possivelmente estariam em momento de recarga durante as diferentes horas do dia, seguindo justamente os horários de recarga que a pesquisa adotou. Dessa forma, por suposição, foi adotado um perfil de recarga para o Brasil, conforme demonstrado no gráfico 3.



Gráfico 3 - Perfil de recarga dos VEs adaptado para o Brasil

Fonte: Autores (2018)

No gráfico 3, foi atribuído que no horário das 21h estariam cerca de 95% dos veículos em carregamento, bem como, nos horários de ponta se concentram os maiores percentuais destes veículos em recarga.

Baseado nas metas internacionais de banir os VCI, considerando uma frota de veículos nacional de 36.189.608 carros, com autonomia de 6,75Km/KWh, sendo 100% elétrica, e percorrendo uma distância média anual de 10000 km, em média percorreriam 27,39 km por dia durante este mesmo ano, tendo um consumo diário de 146,8MWh. Sendo justificada pela equação 2.

$$CED = (FT \cdot D) / DM \text{ (Eq. 2)}$$

Onde:

CED – Consumo de Energia Elétrica Diário (KWh)

FT – Frota Total de Veículos do ano de 2017

D – Distância Média Percorrida por dia (Km)

DM – Desempenho Médio do Veículo (Km/KWh)

Então, obtendo um consumo diário de 146,8MWh proveniente da recarga das baterias da frota total, atribui-se que em cada hora do dia, dividindo-se igualmente entre as 24 horas, têm-se uma demanda de potência de 6,116 MW.

Através do consumo de energia elétrica anual encontrado inerente da recarga das baterias dos VEs no valor de 53,61 GWh, conforme estudo representado pela tabela 2, considerando uma frota de automóveis 100% elétrica, é possível estimar a curva de carga anual do carregamento das baterias dos VEs representada no período do dia, conforme será apresentado pelo gráfico 4.



Gráfico 4 - Curva de carga anual dos VEs

Fonte: Autores (2018)

O gráfico 5, tem por finalidade apresentar o somatório das duas curvas (curva de carga média do ano de 2017 de todo Sistema Interligado Nacional (SIN) com a curva de carga de carregamento das baterias), com o objetivo de mostrar o acréscimo na demanda de energia

durante os horários de ponta.

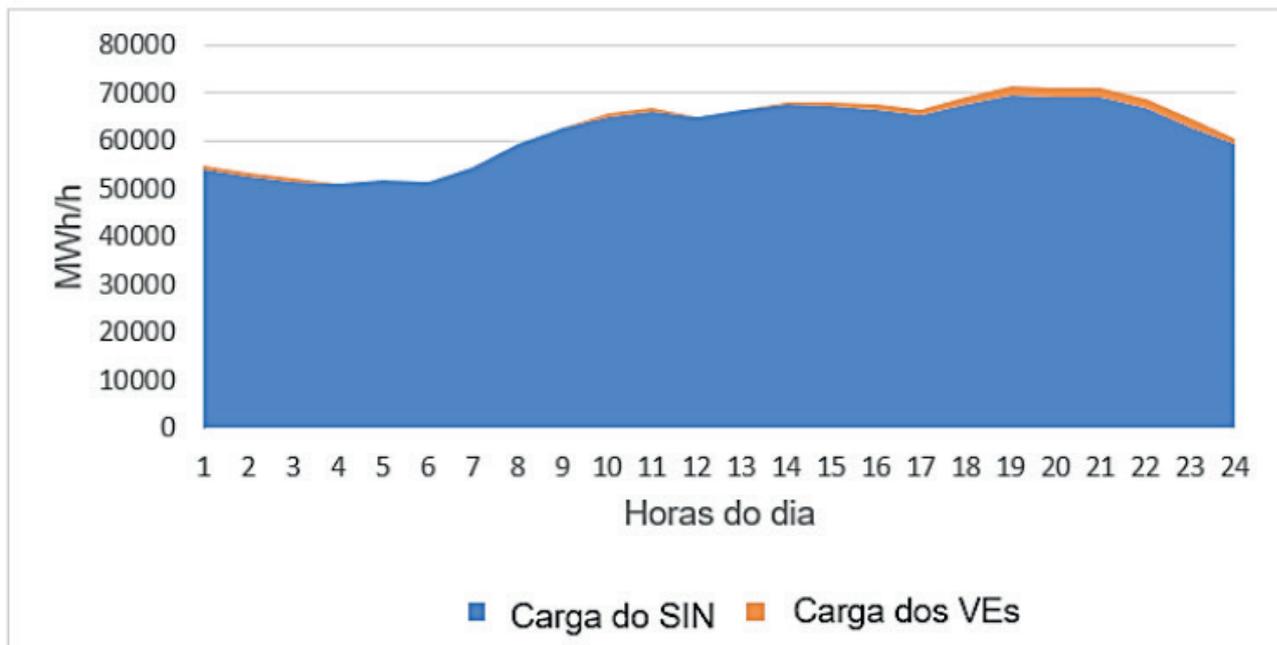


Gráfico 5 - Somatório carga do SIN com carga dos VEs

Fonte: Autores (2018)

Como observado no gráfico 5, houve um acréscimo na demanda exatamente nos horários de ponta devido ao perfil de recarga brasileiro, sobrecarregando ainda mais o sistema energético.

Partindo da ideia de que se a maior parte da recarga dos veículos elétricos for realizada fora do horário de ponta (madrugada - período de menor demanda), os consumidores estariam ajudando o sistema e aproveitando esta energia de forma mais econômica e consciente. É aqui que surge a importância dos modos de recarga inteligentes que podem ser aprimorados com os sistemas de gerenciamento de energia.

Elaborando um perfil de carregamento que seja mais adequado para o SIN, foi adotado que o carregamento da maior parte dos veículos seja realizado fora do horário de ponta, dessa forma evitando sobrecarregar o sistema. Conforme apresentado pelo gráfico 6.



Gráfico 6 - Perfil de carregamento mais adequado dos VEs para o Brasil

Fonte: Autores (2018)

Estabelecido o novo perfil de recarga das baterias, os valores de potência solicitados ao sistema, sofrem um deslocamento para o período da madrugada, horários em que a demanda de energia nacional sofre uma queda, sendo ideal para o início da recarga dessas baterias.

Para conclusão desta análise, foi elaborado um gráfico capaz de apresentar como o sistema se comportaria diante do acréscimo das potências de recarga fora dos horários de ponta, devido a nova caracterização do perfil de carregamento das baterias, exemplificando como seria essa distribuição de carga mais adequada durante as diferentes horas do dia. O novo comportamento da curva de carga do sistema e ilustrado no gráfico 7.

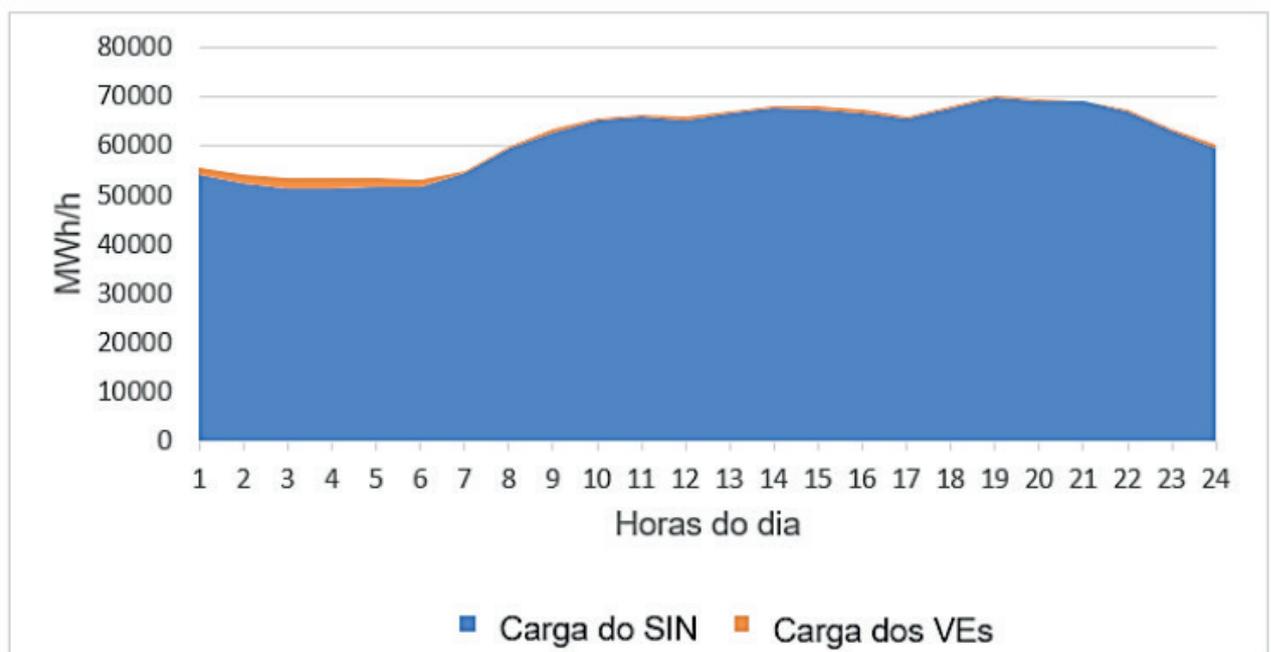


Gráfico 7 - Curva de carga com carregamento dos VEs em horário adequado

Fonte: Autores (2018)

2.3 Infraestrutura de Recarga

Em relação as recargas domésticas, normalmente ao adquirir um veículo totalmente elétrico ou híbrido plug-in os mesmos costumam vir de fábrica com um carregador incluso, do tipo lento o demandaria cerca de oito horas conectado à rede elétrica para carga total das baterias. Uma nova alternativa para otimizar e diminuir o tempo de recarga é a instalação de uma estação de recarga residencial semi-rápida, o que acarretaria em um custo adicional ao consumidor. As estações de recarga semi-rápidas, com duração de recarga total das baterias entre duas e oito horas aparecem como uma excelente alternativa, sendo necessária a utilização de um medidor que atenda às suas especificações, dessa forma reduzindo o tempo de recarga das baterias nas residências. Empresas do ramo cobram entre R\$ 7.000,00 a R\$ 8.500,00 com custos de instalação inclusos, porém, esse valor pode aumentar dependendo da necessidade de modificação da estrutura da instalação elétrica das residências que utilizam apenas tensão de 110V, uma vez que os carregadores semi-rápidos geralmente são para tensão de 220V. O consumidor pode optar também por carregadores mais sofisticados que além de carregarem as baterias fornecem relatórios de gerenciamento de energia, podendo a chegar ao valor de R\$ 22.000,00 (REIS, 2018).

Atualmente no Brasil ainda há poucos eletropostos disponíveis e para o efetivo sucesso da inserção dos veículos elétricos no país será necessária um grande investimento para aumentar e distribuir por todos os estados e regiões pontos de recarga, o que levará o consumidor a ficar mais confiante em adquirir um VE.

Podemos citar como principais investimentos existentes no país 10 eletropostos distribuídos ao longo da rodovia dos bandeirantes em São Paulo, primeira rede intermunicipal de recarga, instalados em parceria com CPFL energia, empresa privada do ramo de mobilidade elétrica e os eletropostos inaugurados em 18 de julho de 2018 na Rodovia Presidente Dutra (BR 116) entre São Paulo e Rio de Janeiro, sendo distribuídos 3 em cada sentido e com intervalo médio de 100Km entre cada eletroposto, com isso torna-se possível transpor os 434 Km que separam os dois estados com um veículo totalmente elétrico. A instalação dos eletropostos ao longo da Dutra se deu a partir de um projeto com investimento da empresa EDP e da BMW, em parceria com a Electric Mobility Brasil. Os equipamentos do modelo Efacec QC45 fornecidos pela Electric Mobility Brasil estão disponíveis com os três tipos de conectores (plugs) existentes no mundo: o Plug CCS, o ChADEMO e o plug AC de 43KVA. Portanto os eletropostos da Electric Mobility Brasil, buscam assegurar o abastecimento de todos os modelos de veículos elétricos emplacados no Brasil e veem com a proposta de recarregar 80% das baterias de todos os tipos de veículos elétricos comercializado no Brasil entre 20 e 30 minutos e 1 hora para carga total (ABVE, 2018).

Novas possibilidades para se administrar o impacto causado na rede elétrica devem surgir, entre elas, a utilização da tarifação horária que torna possível o deslocamento do consumo para horários fora de ponta, e também a utilização de sistemas inteligentes (smart-grids)

Os painéis fotovoltaicos despontam como boa alternativa, para a geração de energia

elétrica destinada ao carregamento das baterias e já estão sendo utilizados tanto em residências quanto em locais públicos, como em estacionamentos de shoppings

3 | CONCLUSÃO

Em virtude do estudo realizado, a conclusão alcançada indica que a participação de veículos elétricos e híbridos no cenário atual do setor de transportes brasileiro ainda é modesta, entretanto apresentam uma evolução considerável no crescimento da frota, de acordo com os registros dos números de licenciamentos por ano. Para a introdução perdurável dos veículos elétricos plug-in no país, será fundamental a consolidação de infraestrutura capaz de atender efetivamente esta frota, pois o investimento realizado pelo consumidor é elevado, então o Brasil, com o objetivo de atender as determinações estabelecidas no Acordo de Paris (2015), precisa garantir que esta aquisição será realmente viável para o consumidor. As políticas públicas detêm papel fundamental neste momento, com o objetivo de assegurar incentivos monetários (como subsídios, redução de taxas e impostos, pedágios, construção de eletropostos), e incentivos não-monetários (constituir regulação).

Com relação ao estudo de Demanda de Energia, importante compreender que como a participação dos veículos elétricos e híbridos plug-in ainda é pequena no setor de transportes, o SIN ainda possui a capacidade de suportar esta penetração. Entretanto, como apresenta uma aceitação otimista comprovada pelo crescimento acentuado nos últimos anos, relevante que se estabeleça uma comunicação compenetrada entre a Associação Brasileiro do Veículo Elétrico (ABVE) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a busca de soluções prévias. Grandes desafios existem, pois o custo de um veículo elétrico ainda é muito elevado, e as particularidades que o circundam também exigem altos investimentos. Entretanto, a mobilidade elétrica pode oferecer inúmeros benefícios para o ecossistema, e com o suporte do acelerado avanço tecnológico atrelado às metas estabelecidas por países, se torna uma realidade cada vez mais próxima.

REFERÊNCIAS

ABVE – Associação Brasileira do Veículos Elétricos. **Eletromobilidade em SP: íntegra das palestras**. Disponível em: < <http://www.abve.org.br/seminario-discute-eletromobilidade-em-sp-veja-a-integra-das-palestras/> >. Acesso em: 31 mar. 2018.

ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico. **Electric Mobility Brasil instala eletrovia na Dutra**. Disponível em:<<http://www.abve.org.br/electric-mobility-instala-eletrovia-na-dutra>>. Acesso em: 13 set. 2018.

ANEEL Nº 482. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL**, p. 4, Abril 2012. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

ANEEL Nº 517. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL**, p. 3, Dezembro 2012. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. Disponível em: < <http://www.virapagina.com.br/anfavea2018/1/#zoom=z>>. Acesso em: 08 jul. 2018

BARASSA, E. **Trajatória Tecnológica do Veículo Elétrico: Atores, Políticas e Esforços Tecnológicos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Política Ciência e Tecnologia) - UNICAMP. Campinas, p. 132. 2015.

BORBA, B. S. M. C. **Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, p. 179. 2012.

IEA – International Energy Agency. **Nordic EV Outlook 2018**. Disponível em: < <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/nordic-ev-outlook-2018.html> >. Acesso em: 31 mar. 2018.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico Janeiro 2018**. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2018>>. Acesso em: 24 set. 2018.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Histórico de Operação**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx>. Acesso em: 03 ago. 2018.

REIS, A. **Mobilidade. Carros UOL**, 2018. Disponível em: <<https://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2018/05/04/carregador-de-carro-eletrico-quanto-custa-instalar-em-casa-ou-no-trabalho.htm>>. Acesso em: 8 Setembro 2018.

ELETRODEPOSIÇÃO DE SEMICONDUTORES PARA APLICAÇÃO EM ENERGIA RENOVÁVEL

Data de aceite: 19/06/2020

Victor Rocha Grecco

RESUMO: O presente projeto de pesquisa teve como objetivo geral desenvolver e estudar materiais semicondutores aplicados a energias renováveis. Para isso, foram produzidos e caracterizados filmes finos de óxidos semicondutores de titânio (TiO_2) e cobre (Cu_2O) pelo processo de eletrodeposição. Esses materiais podem ser utilizados futuramente como fotoeletrodos para a produção de H_2 mediante processos fotoeletroquímicos, em células solares, em células solares sensibilizadas por um corante (DSSC – Dye sensitive solar cell), etc. As propriedades físicas dos filmes foram investigadas através de Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM). Filmes de Cu_2O eletrodepositados sobre os filmes de TiO_2 , também foram produzidos neste trabalho, obtendo-se assim as heterojunções (p-n) de $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$.

PALAVRAS CHAVE: Óxido de cobre, óxido de titânio, eletrodeposição, energias renováveis.

ABSTRACT: The present study focuses

on produce and characterize thin films of semiconductor oxides, such as, titanium oxide (TiO_2) and copper oxide (Cu_2O). The physical properties of those semiconductors allow them to be applied in renewable energy, such as, solar cells [1], photoelectrodes for hydrogen production [2] and Gratzel cell/ dye sensitive solar cell [3]. The films was produced using the potentiostatic electrodeposition method, which consist at fix a potential over time, where the current is monitored by a current transient. The solution used in the deposition of TiO_2 films consist of 0.02M TiOSO_4 , 0.1M KNO_3 and 0.06M H_2O_2 , with $\text{pH} = 2$, at room temperature (around 20°C) on ITO/glass substrate. Cyclic voltammetry was made to investigate the reduction potential to be fixated during the electrochemical deposition, that potential was -1.1 V (see figure a.). Through a current transient is possible to control the desired charge of deposited materials, the charge was -1 C for all samples. After the deposition, the films were subjected to a heat treatment in environment atmosphere at temperature of 500°C . Scanning electronic microscopy (MEV) and x-ray diffractions (DRX), were also done, getting information about the morphology and crystallinity of the films respectively as show in figure b and c.

KEYWORDS: Copper oxide, titanium oxide,

electrodeposition, renewable energy.

1 | INTRODUÇÃO

A produção de energia baseada em combustíveis fósseis libera CO_2 para a atmosfera, contribuindo com o aumento do efeito estufa e da temperatura global [1, 2, 3]. Para minimizar impactos ambientais, a busca por fontes de energia limpa e renovável é de interesse mundial.

Nessa busca, o processo de obtenção de H_2 a partir da redução fotoeletroquímica da água tem sido uma alternativa. Uma célula fotoeletroquímica (PEC) é composta por dois fotoeletrodos (o fotocátodo e o fotoânodo) mergulhados em um eletrólito aquoso [4]. Esse processo necessita que se aplique uma diferença de potencial entre os eletrodos para que a reação de quebra da molécula de água ocorra [3]. Visando minimizar ao máximo esse potencial aplicado, é possível utilizar um eletrodo foto sensível (semicondutores) irradiando-o com luz, para que o processo de decomposição da água ocorra em potenciais muito mais baixos. O ideal seria encontrar um material que trabalhe em potencial próximo de zero, usando a luz solar para promover a reação de quebra da molécula de água.

As células fotoeletroquímicas (PECs, do inglês *photoelectrochemical cell*) podem converter energia luminosa em eletricidade e quando a luz incide sobre o fotoeletrodo com energia acima da energia do gap, ocorre a formação de pares elétron-buraco viabilizando a reação. Recentemente, em um trabalho publicado na revista Nature [7], foi demonstrado que o semicondutor Cu_2O -p pode ser um bom fotocátodo desde que sua superfície seja revestida por algumas camadas de outros materiais que aumentam a resistência à corrosão em meio aquoso. As fotocorrentes atingidas para os filmes de Cu_2O foram da ordem de $-5,7 \text{ mA/cm}^2$ com camadas protetoras e tratamento térmico, porém ainda distante do valor teórico de $-14,7 \text{ mA/cm}^2$ para o Cu_2O [7].

Um material também usado como fotoeletrodo é o TiO_2 que é um semicondutor tipo n e resistente a corrosão em meio aquoso, porém seu gap óptico é de 3,2 eV, limitando seu uso à faixa do ultravioleta. No entanto, o gap do Cu_2O é 2,17 eV, podendo assim absorver luz também no espectro visível [8, 9, 10].

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Deposição Eletroquímica

A eletrodeposição, deposição eletroquímica ou eletrossíntese é um processo onde reações de oxirredução envolvendo íons dissolvidos em um eletrólito resultam na formação de depósitos sobre um substrato. Para isso deve-se utilizar um sistema que contenha um circuito externo, duas interfaces de eletrodo com eletrólito e uma solução eletrolítica, onde três eletrodos são submersos. Esses três eletrodos são: O eletrodo de referência, o eletrodo de trabalho e o contra-eletrodo. Esse sistema está demonstrado na figura 1:

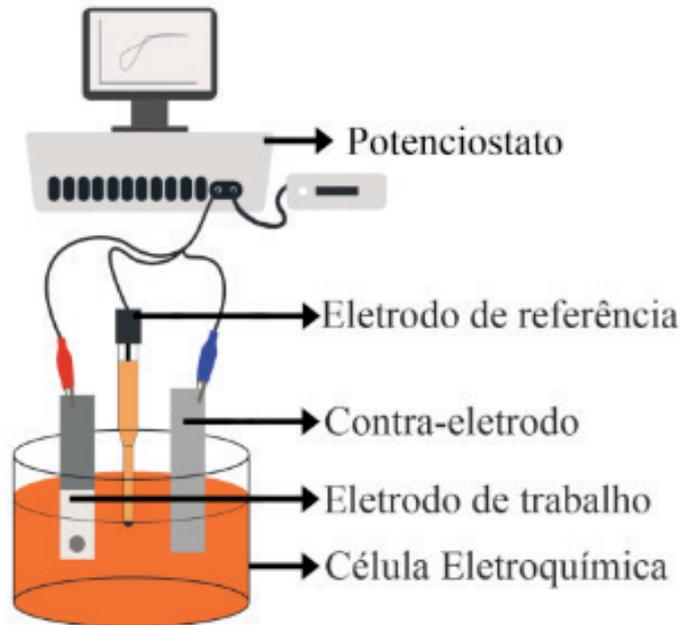


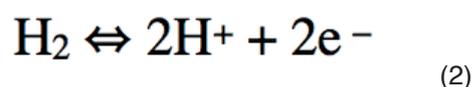
Figura 1: Aparato experimental para a realização da eletrodeposição (potenciostato e célula eletroquímica).

A transferência de carga através de uma interface eletrodo/eletrólito promove reações químicas que são tratadas em eletroquímica como semi-reações de oxidação e redução. Para cada reação ocorrer na natureza, é necessário que a interface tenha uma energia mínima para a ocorrência dessas reações. Essa energia está associada a diferença de potencial ΔV entre eletrodo e eletrólito, e o potencial mínimo para a ocorrência da reação é o chamado potencial de oxi-redução ou potencial redox (V_{redox}). O valor de V_{redox} depende de vários fatores, tais como concentração dos íons, temperatura (T) do processo e afinidade química [17]. Essas dependências estão resumidas na equação de Nernst (BARD; FAULKNER, 2001; MEMMING, 2001):

$$V_{redox} = V_{0,redox} + (RT/nF) \ln(A_{ox}/A_{red}) \quad (1)$$

onde A_{ox} e A_{red} são as atividades químicas das espécies Ox e Red, respectivamente, $V_{0,redox}$ é o potencial redox quando $A_{ox} = A_{red}$, R é a constante dos gases ideais, n é o número de mols de elétrons transferidos e F é a constante de Faraday.

No entanto, diferença de potencial é uma grandeza relativa, e por isso é necessário a comparação deste valor com uma escala eletroquímica padrão de potenciais. A escala padrão aceita pela comunidade científica é a escala do eletrodo-padrão de hidrogênio (SHE, Standard Hydrogen Electrode), no qual ocorre a seguinte reação (BARD; FAULKNER, 2001):



É acordado que essa reação ocorra a potencial nulo, e a diferença de potencial para a ocorrência de qualquer outra semi-reação é referenciada em relação a ela. Com o conhecimento dos potenciais de oxidação (redução) de determinado íon presente em um eletrólito, o controle da diferença de potencial ΔV permite o controle da taxa com que a reação ocorre [17].

A formação do gel de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ se dá da seguinte maneira: com a redução do nitrato NO_3^- no cátodo ocorre o aumento de pH da interface eletrodo/eletrólito, este aumento de pH por sua vez leva à hidrólise do precursor TiO^{2+} . Devido a insolubilidade das moléculas de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ ocorre a continuação do processo eletroquímico onde há uma conexão dessas moléculas formando uma rede, localizada na superfície do cátodo. Durante este processo a rede fica dispersa causando uma suspensão chamada sol. Com a continuação do processo criam-se redes cada vez maiores. Por fim é criado o gel de oxi-hidróxido de titânio ($\text{TiO}(\text{OH})_2$) que sofre uma desidratação por meio de um tratamento térmico e obtêm-se TiO_2 cristalino e mesoporoso, o que contribui no aumento de área superficial desses filmes. [11, 17]. Tais processos descritos acima estão representados resumidamente na figura 2 abaixo

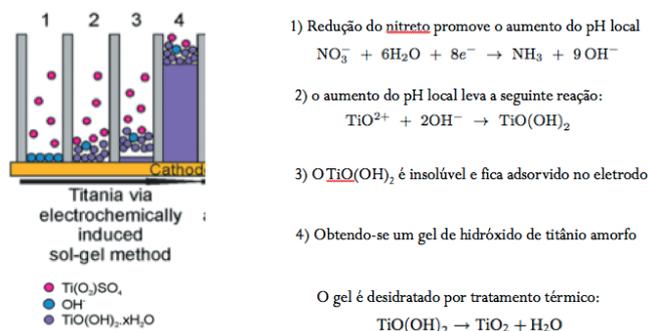


Figura 2: Esquema demonstrando as etapas de formação do gel de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ e dos filmes de TiO_2 após desidratação do gel mediante tratamento térmico (500°C) [11].

Existem duas técnicas eletroquímicas utilizadas para o crescimento de materiais. Uma delas é a deposição **potenciostática**, na qual se promove as reações de oxi-redução mantendo constante a diferença de potencial elétrico entre o eletrodo de trabalho (ET) e o eletrodo de referência (ER), enquanto se registra os valores de corrente elétrica entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo. A curva que representa o comportamento da corrente de deposição em função do tempo é denominada transiente de corrente. A outra técnica é a deposição **galvanostática**, em que se cresce o material mantendo fixo o valor da corrente elétrica entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo, independente dos valores observados para o potencial elétrico entre os eletrodos de referência e o de trabalho, os quais podem ser registrados em função do tempo (transiente de tensão) [15].

2.1 Voltametria Cíclica

Para a realização da voltametria cíclica é usado um potenciostato. Esta é uma técnica de varredura de potencial, que tem como objetivo encontrar informações sobre as correntes que ocorrem durante as reações. Se chama voltametria cíclica porque começa e termina no

mesmo potencial, e vai varrendo os valores de potencial até o valor selecionado previamente. Na figura 3 (a) observa-se que o potencial sai de um potencial inicial vai até um ponto de potencial, pré-estabelecido, e retorna ao seu potencial inicial. Seguindo a seta, quando o potencial diminui a corrente catódica aumenta até um máximo da mesma (em módulo), e depois passa decair até o potencial escolhido. Quando chega a este potencial a varredura vai no sentido oposto, onde o potencial aumenta, o que faz a corrente anódica aumentar até um máximo. Após esse máximo a corrente anódica passa a diminuir. É utilizando esses picos que, geralmente, se tiram as informações necessárias, por exemplo para a realização de uma deposição eletroquímica.

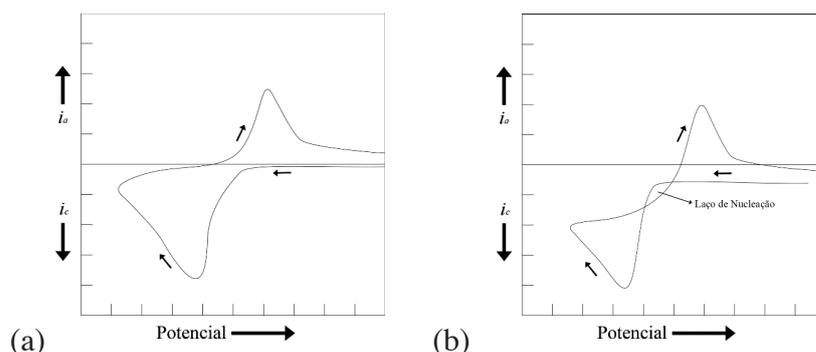


Figura 3: (a) Voltametria cíclica, onde i_a é a corrente anódica e i_c é a corrente catódica. (b) Outra voltametria cíclica com um laço de nucleação.

Na figura 3 (b) pode-se observar o caso de voltamograma, onde há a presença de um laço de nucleação. A formação dos mesmos ocorre quando o material do substrato é diferente do depositado sobre ele. Assim, necessitam de mais energia para se fixarem na superfície do eletrodo durante a formação de núcleos, e por isso há este laço observado na figura, que é conhecido como laço de nucleação [15].

3 | METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados na síntese e caracterização dos filmes de TiO_2 depositados sobre ITO/vidro (Óxido de estanho-índio) e Cu_2O depositado sobre TiO_2 /ITO/vidro. O método de eletrossíntese potencioestática (conforme seção 2.1) foi utilizado para obter os filmes de hidróxido de titânio (amorfo) e em seguida foram submetidos a um tratamento térmico obtendo-se TiO_2 (cristalino). O procedimento descrito de forma detalhada e as etapas necessárias para a preparação dos filmes consta nas próximas seções.

3.1 Preparação dos eletrodos de Trabalho

Os substratos de ITO/ vidro foram cortados em quadrados de aproximadamente 1 cm^2 e limpos. O corte é feito pelo lado não condutor, que é verificado utilizando-se um multímetro. A limpeza é realizada seguindo o procedimento que contém os seguintes passos, nessa ordem:

- i) Em um béquer com 50% de detergente e 50% de água deionizada (18 Mega Ohms de condutividade) colocar o substrato para agitar durante 380 s no ultrassom
- ii) Em um béquer com acetona colocar o ITO/vidro por 380 s no ultrassom
- iii) Em um béquer com álcool colocar o substrato por 380 s no ultrassom
- iv) Retirar o substrato e secar o excesso com nitrogênio

A montagem do eletrodo de trabalho está demonstrada na Figura 1. Cada substrato é fixado a uma haste de aço inox através de uma fita adesiva dupla-face, com a face do filme de ITO voltada para cima. Abaixo da fita ligando a face condutora (ou seja, o ITO) à haste foi utilizado um fio de cobre, proporcionando um contato elétrico (ôhmico) entre a haste e o ITO. A fita adesiva dupla-face contém um orifício de 0,5 cm² para deixar esta área do substrato (ITO) ficar exposta (em contato com a solução) para a realização da deposição do filme. Após a fixação da fita adesiva o eletrodo é enxaguado com água deionizada logo antes de ser colocado dentro da solução eletrolítica.

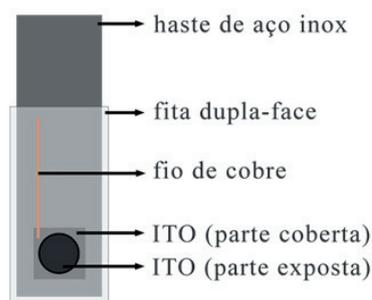


Figura 4 – Esquema de montagem do eletrodo de trabalho (ET).

3.2 Preparação do eletrólito de TiO₂ e Cu₂O

No preparo a solução de TiO₂ (100 ml) foram utilizados os seguintes reagentes: H₂O deionizada, 0,3 g de TiOSO₄ (oxi-sulfato de titânio), assim como 1,01 g de KNO₃ (nitrato de potássio) e também 0,2 g de H₂O₂ (peróxido de hidrogênio). Essa solução utilizada neste trabalho é baseada no trabalho anterior de Karuppuchamy et al. (2002). A forma de preparo seguiu os seguintes passos:

- i) Foram acrescentados, nesta ordem, água deionizada, preenchendo 50% do volume, 0,3 g de TiOSO₄, assim como 1,01 g de KNO₃ e também 0,2 g de H₂O₂.
- ii) A solução é colocada em agitação magnética por aproximadamente 50 minutos (a 40 rpm).

A solução mostra aparência de cor branca até a adição de H₂O₂, quando essa então fica de uma tonalidade alaranjada. Também se nota que a princípio a solução possui um aspecto turvo, aspecto que logo dá lugar a uma aparência mais translúcida com uma precipitação.

Após esta precipitação foi realizado o procedimento para medir o pH desta solução, que resultou num valor aproximado de 1,83.

Agora, vamos discutir resumidamente os procedimentos para a eletrodeposição e Cu_2O , que já foi largamente estudada pelo grupo LFFS [14, 15, 18]. Os substratos utilizados para a deposição de óxido de cobre foram filmes de óxido de titânio eletrodepositados em lâminas ITO (como descrito acima). Assim, o eletrodo de trabalho está pronto para ser mergulhado no eletrólito (solução) para o início da deposição. A reação eletroquímica envolvida na deposição de Cu_2O é a redução de Cu^{2+} representada pela reação: $2 \text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$. A redução do Cu^{2+} , dependendo do potencial aplicado, também pode levar a formação de depósitos de cobre através da reação $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0$. Para uma mesma solução aplicando-se potenciais mais negativos, da ordem de - 0,8 V, teremos a redução de íons de cobre e o crescimento de uma camada de cobre. A deposição de Cu_2O do tipo p é normalmente favorecida em ambiente básico, enquanto que a deposição do tipo n é favorecida em ambientes com valores menores de pH, sendo o potencial de deposição do $\text{Cu}_2\text{O-p}$ (- 0,5 V), menor (em módulo) do que o do Cu (- 0,8 V) metálico. Para se definir os potenciais de eletrodeposição adequados para o crescimento dos óxidos de cobre do tipo p e n é necessário que se façam voltametrias, porém usamos resultados já conhecidos na literatura para depositá-lo sobre TiO_2 . O eletrólito utilizado é a solução composta por 0,4 M CuSO_4 (sulfato de cobre), 3,0 M $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ (ácido láctico) e NaOH (hidróxido de sódio), onde o ácido láctico serve como complexante dos íons de Cu de modo a minimizar os efeitos de precipitação no eletrólito [14, 15]. A temperatura durante a deposição foi mantida em 23 °C e o pH ajustado em 7,5. O potencial de deposição foi de - 0,5 V, obtendo-se assim $\text{Cu}_2\text{O-p}$ sobre TiO_2 (conforme apresentado a seguir na figura 8b).

3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica dos filmes produzidos foi realizada através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV-FEG) modelo JOEL JSM-6701F. Essa técnica de caracterização permite alcançar aumentos muito maiores do que seria possível através de um microscópio óptico com precisão de nanômetros ou angstroms (dependendo da energia do feixe incidente). Ao incidir sobre a amostra o feixe (PE) produz a emissão de diversas radiações, tais como: fótons de raios-x (característicos), elétrons retroespalhados (backscattering) (BSE) e elétrons secundários (SE) cujos mecanismos de emissão estão respectivamente representados na figura 5.

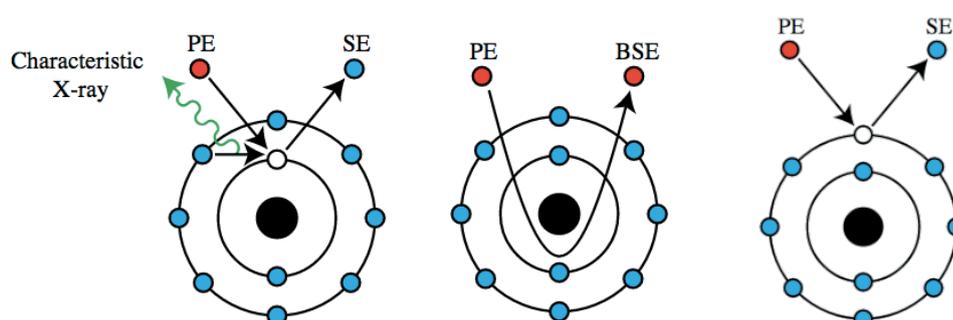


Figura 5: mecanismo de emissão de raios-x (característicos), elétrons retroespalhados (BSE) (backscattering) e elétrons secundários (SE) respectivamente, originados através da interação do feixe (PE) de elétrons com os átomos de uma amostra [6].

Oriundos de espalhamentos inelásticos, os elétrons secundários (SE) são emitidos de muito perto da superfície da amostra, produzindo imagens de alta resolução. Por outro lado, os elétrons retroespalhados (BSE) são elétrons do feixe que foram refletidos da amostra elasticamente. Eles emergem de locais mais profundos e conseqüentemente a resolução das imagens de BSE é geralmente mais pobre do que imagens de SE.

A emissão de fótons de raio-x característico, ocorre através de espalhamento inelástica. Assim, a interação do feixe de elétrons com átomos da amostra gera uma vacância eletrônica, e quando um outro elétron ocupa essa vacância se gera um fóton, que é o raio-x característico. A energia desse fóton é usada para identificar um determinado elemento da amostra, para isso é instalado um detector de raio-x na câmara a vácuo do MEV. E dessa forma, tendo um detector de raios-x, pode-se identificar os elementos químicos presentes na amostra (ex: Si, Au, Cr, Ti, O, Cu, etc). Esta análise é conhecida como Espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

3.4 Difração de Raios-X

A caracterização estrutural dos filmes foi realizada através da técnica de Difração de Raios-X (DRX) em filmes finos de oxido de titânio tratados em ar e sem tratamento algum. A difração de raios-X é um fenômeno de interação entre a radiação eletromagnética e a mataria ordenada. Uma condição para que ocorra a difração é que o comprimento de onda da radiação incidente seja da mesma ordem de grandeza do espaçamento interatômico do material analisado.

A Figura 6 (a) representa os planos cristalinos de um sal NaCl em (b) temos os raios-x incidindo e refletindo sobre os planos e em (c) a geometria esquemática dos raios incidentes e refletidos sobre dois planos cristalinos.

A difração é observada quando os raios refletidos (ou seja, 1' e 2' da figura 6c) interferem construtivamente. Esta condição ocorre quando $2d\sin\theta$ é igual a um número inteiro (m) de comprimentos de onda (λ). Caso contrário a interferência é destrutiva.

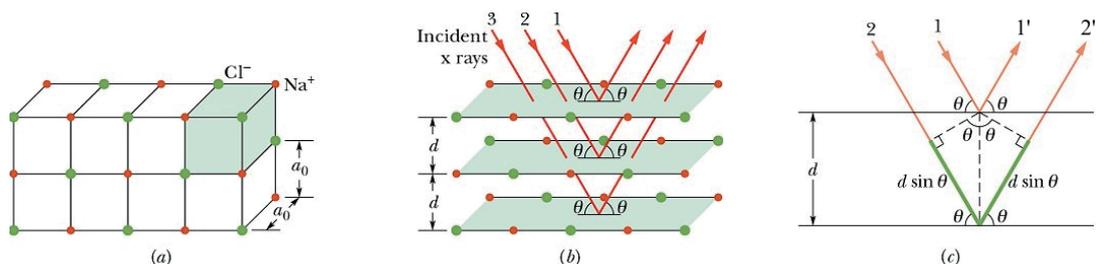


Figura 6: (a) planos cristalinos de um sal NaCl, (b) raios-x incidindo e refletindo sobre os planos, (c) geometria esquemática dos raios incidentes e refletidos sobre dois planos cristalinos.

A condição de difração fica então estabelecida pela lei de Bragg representada pela

equação:

$$2 d \operatorname{sen}(\theta) = m \lambda$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

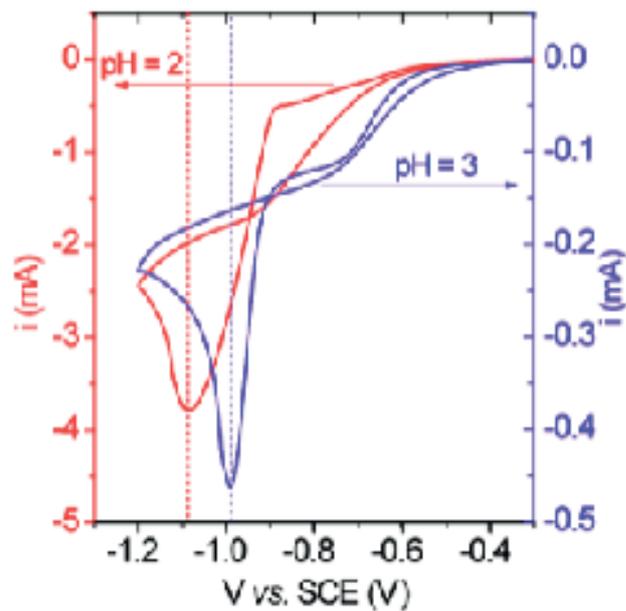
Onde d é a distância entre os planos cristalinos, θ é o ângulo de incidência do feixe e λ é o comprimento de onda do feixe incidente (1.54 Å), por fim m é um número inteiro. Cada direção de cada face (ou plano) do material é descrita através de vetores perpendicular ao plano em questão. Os vetores que representam as direções são identificados por três índices entre colchetes desta forma: [x y z]. E os vetores que representam os planos são representados por índices entre parênteses (h k l), conhecidos como Índices de Miller [15].

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

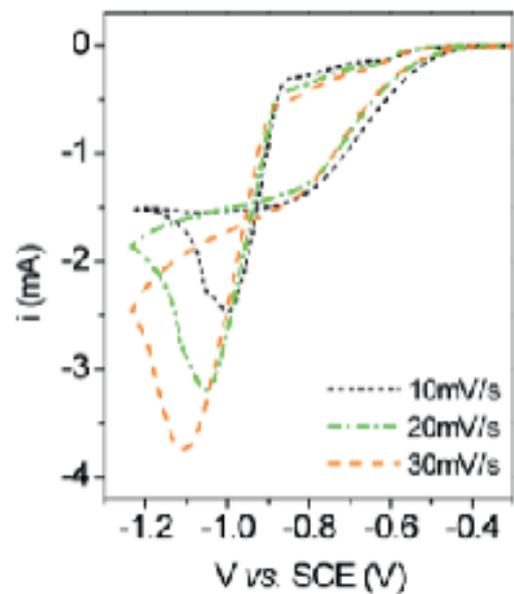
4.1 Voltametrias

Na realização das voltametrias e das deposições dos filmes foi montada a seguinte configuração: mergulhou-se três eletrodos na solução eletrolítica. O eletrodo de trabalho foi o ITO de acordo com o procedimento descrito na seção 3.1 e demonstrado na figura 4. O contra eletrodo foi uma lâmina de platina. E o eletrodo de referência o calomelano saturado (SCE, Saturated Calomel Electrode, eletrodo de calomelano saturado). Estes três eletrodos estavam conectados a um potenciostato (AutoLab) que monitora a corrente e o potencial entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho.

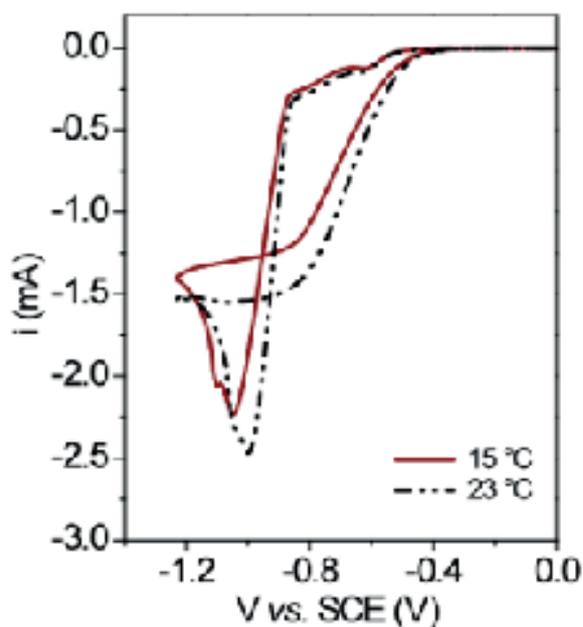
As voltametrias foram utilizadas para monitorar a corrente em função do potencial que atua no eletrodo de trabalho. Existem parâmetros que podem influenciar no comportamento das reações eletroquímicas. Esses fatores são por exemplo: pH da solução, velocidade de varredura, temperatura da solução etc. Para avaliar a influência do pH da solução foram realizadas voltametrias em pH igual a 2 e 3 aproximadamente (e com temperatura constante), conforme figura 7a. Já para a variável da velocidade de varredura, foram fixadas 10 mV/s, 20 mV/s e 30 mV/s, conforme figura 7b. E por fim, para analisar a influência da temperatura fixou-se os valores de 15 °C e 23 °C durante o processo de voltametria (com pH constante de 1.8 e velocidade de varredura 10 mV/s), conforme figura 7c. A influência do substrato de Au evaporado sobre silício [100] e ITO durante a varredura está representada na figura 7d.



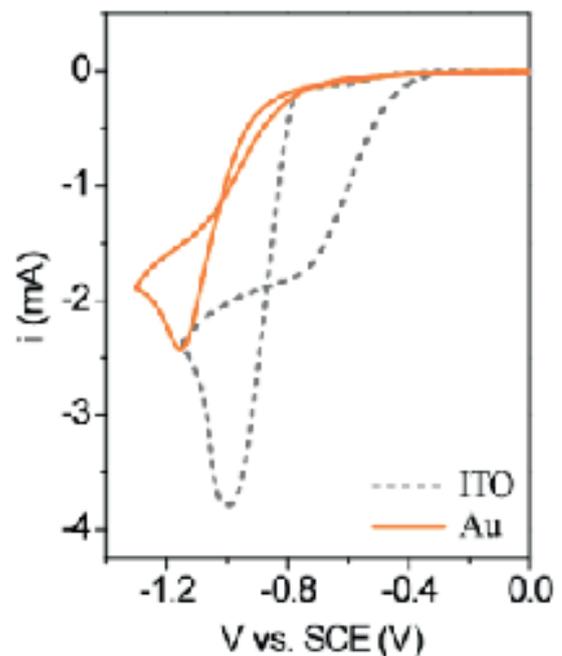
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7: Voltamogramas de filmes finos de TiO_2 em substrato de ITO/vidro em função do pH da solução (a) e em função da velocidade de varredura (b) em função da temperatura (c) e em função. (d) Voltamogramas de filmes finos de TiO_2 em substrato de ITO/vidro e também Au/Si [100].

Analisando a influência do pH da solução durante a voltametria (figura 7a), observa-se que para eletrólitos mais ácidos temos correntes de deposição maiores, devido a maior concentração de íons H^+ disponíveis no processo. O laço de nucleação quase não aparece para pH igual a 3, a corrente é menor e o potencial também é menor (em módulo). Ao final da varredura, o filme não aderiu ao substrato. Neste caso, a corrente é muito pequena,

insuficiente para gerar depósitos que cobram todo o substrato, diminuindo assim o laço de nucleação.

Na figura 7b, observa-se que para velocidades menores (10 mV/s), o pico de potencial de deposição ocorre antes, já que o processo é mais lento e dispõe de mais tempo para que todo o filme depositado cubra o substrato. Em processos mais rápidos (20 mV/s e 30 mV/s) é necessário um potencial mais elevado (em módulo), para que o filme cubra o substrato por completo. Uma velocidade de varredura maior também implica em uma maior corrente (toda a cinética do sistema é aumentada).

A cinética do sistema também aumenta com a temperatura. O aumento da energia cinética dos íons solvatados, faz com que mais íons tenham a energia suficiente para chegar à superfície do eletrodo e então na superfície possam ser reduzidos [17]. Na figura 7c, observa-se uma corrente de deposição maior, no processo realizado em maior temperatura. Já o deslocamento do pico na curva de voltametria é previsto pela equação de Nernst (1), que determina que, com o aumento da temperatura, o potencial de redução se desloca para valores mais positivos [17].

A figura 7d, o laço de nucleação quase não aparece quando a voltametria é realizada em substrato de Au e a corrente é menor. Neste caso, foi observado que o substrato não foi totalmente coberto pelo filme, diminuindo assim o laço de nucleação. Processo semelhante ao que ocorreu em pH 3.

4.2 Eletrodeposição

A figura 8a representa uma foto ampliada do filme de TiO_2 /ITO para a visualização da deposição do filme fino de TiO_2 depois de já ter ocorrido o tratamento com ar (à 500 °C). Enquanto a figura 8b representa uma foto ampliada da deposição do filme fino de TiO_2 com tratamento térmico e posterior deposição do filme de Cu_2O .

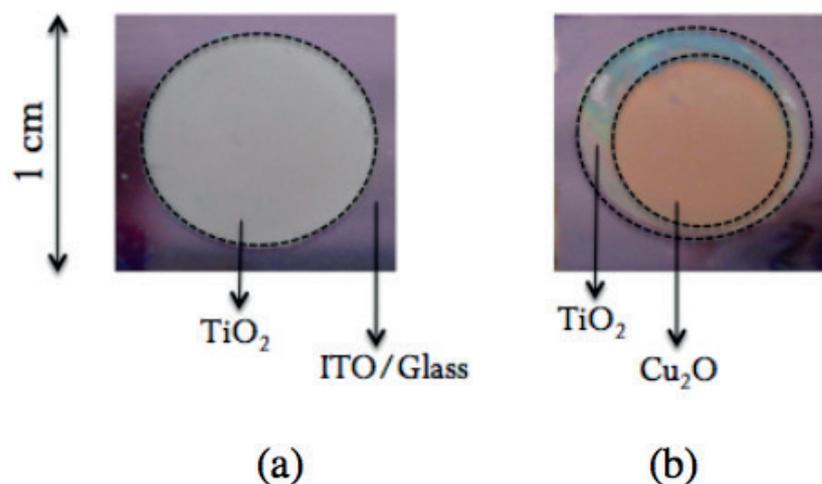


Figura 8: Fotos de filmes finos de (a) TiO_2 – ar (b) e TiO_2 – ar/ Cu_2O sobre substrato de ITO/vidro.

Quando depositado o filme de TiO_2 em ITO, preenche uniformemente toda a superfície do substrato que estava exposta, resultando em um filme de aparência esbranquiçada (figura

8a). Enquanto que o filme de óxido de cobre depositado sobre o filme de titânio, apresenta uma aparência de cor laranja como pode-se ver na figura 8b.

4.3 MEV

Na figura 9 são observadas imagens de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) dos filmes depositados de (a) $\text{TiO}(\text{OH})_2$, (b) TiO_2 depois de tratado com ar e (c) TiO_2 depois de ser tratado com ar e depositado o filme de Cu_2O .

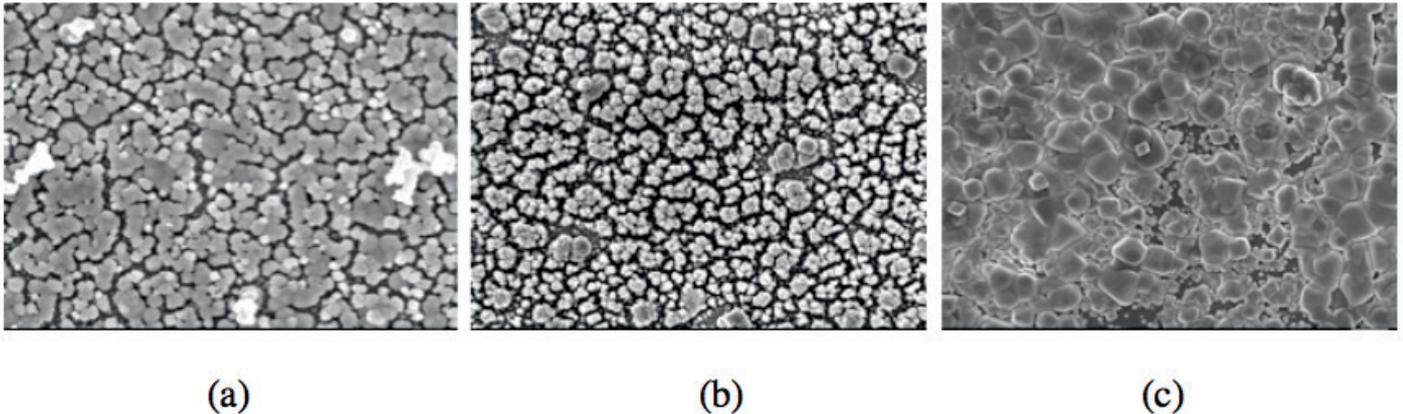


Figura 9: Imagem de MEV-FEG de filmes finos de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ (a) TiO_2 – ar (b) e TiO_2 – ar/ Cu_2O sobre substrato de ITO/vidro (c). Todas as imagens estão ampliadas 20.000x.

Pela figura 9a e b podemos observar que a estrutura dos filmes de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ e TiO_2 é mesoporosa (~ 50 nm de porosidade). A porosidade é útil para que se aumente a área superficial dos filmes. Após o tratamento térmico em ar o espaçamento entre os aglomerados aumenta, deixando a estrutura com maior porosidade. Quando considera-se a deposição do óxido de cobre sobre TiO_2 (figura 9c), observa-se que o tamanho dos grãos dos filmes de Cu_2O são maiores que as estruturas mesoporosas de TiO_2 , cobrindo-as quase que por completo.

4.4 Raio-X

A figura 10 representa um gráfico em que pode-se identificar os picos referente aos filmes de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ (curva verde) e TiO_2 tratados em atmosfera de 500°C (curva azul). Podemos observar que os picos marcados com um asterisco (*) representam picos que são referentes ao substrato (ITO). Observando o gráfico depois do tratamento térmico em ar (curva superior) pode-se perceber que aparecem picos de TiO_2 cristalino, já que o $\text{TiO}(\text{OH})_2$ é amorfo [19].

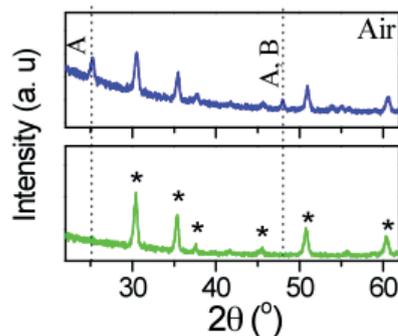


Figura 10: Raio-X de filmes finos de $\text{TiO}(\text{OH})_2$ e TiO_2 – ar sobre substrato de ITO/vidro.

Observa-se através da figura 10 que após o tratamento em ar surgem dois novos picos, referentes ao TiO_2 (anatase e bruquita). O primeiro pico em aproximadamente $47,5^\circ$, corresponde a fase anatase (200). Porém, existem também em $48,04^\circ$ a fase Bruquita (321). Da mesma forma, em $53,77^\circ$ temos a fase Anatase (105), e em $54,24^\circ$ existe a fase Bruquita (230). Estas fases têm picos de DRX muito próximos e é necessário mais estudos (como TEM, Raman,...) para confirmá-las.

5 | CONCLUSÃO

O objetivos apresentados na proposta de pesquisa (PIBIC) foram alcançados com sucesso. Desta forma, foi possível então, contribuir para o desenvolvimento de materiais semicondutores aplicados a energias renováveis, bem como contribuir com a formação científica e tecnológica de um aluno mediante bolsa de iniciação à pesquisa. Foram produzidos e caracterizados os óxidos eletrodepositados através de técnicas de caracterização conforme esperado e planejado no projeto. Alcançou-se maior conhecimento acerca das propriedades morfológicas e estruturais, dos filmes semicondutores de TiO_2 , Cu_2O e sua heterojunções. Pretende-se ainda dar continuidade às investigações já iniciadas e concluir as etapas pendentes. Alguns resultados não foram apresentados aqui pois estão em fase de análise.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Tsui, G. Zangari, *Electrochimica Acta*, **128**, 341 – 348 (2014)
- [2] N. S. Lewis, D. G. Nocera, *Proc. Natl. Acad. Sci U. S. Amer.*, **103**, 15729 (2006)
- [3] P. R. Innocente, Exame de Qualificação – Departamento de Física – UFSC (2015)
- [4] M. Gratzel, Photoelectrochemical cells, *Nature* **414**, 334 – 344 (2001)
- [5] D. Try, A. Fujishima, K. Honda, *Electrochimica Acta*, **45**, 2363 (2000)
- [6] Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope acesso em novembro/2015.
- [7] A. Paracchino, V. Laporte, K. Sivula, M. Grätzel, E. Thimsen, *Nature Materials*, **10**, 456-461 (2011)

- [8] L. Tsui, L. Wu, N. Swami, and G. Zangari, *ECS Electrochemistry Letters*, **1** (2) D15-D19 (2012)
- [9] S. Pelegrini, I. S. Brandt, C. C. Pla Cid, E. A. Isoppo, A. D. C. Viegas, and A. A. Pasa, *ECS J. of Solid State Science and Technology*, **4** (7) P181-P185 (2015)
- [10] W. Siripala, A. Ivanovskaya, T. F. Jaramillo, S. Baeck, E.W. Mcfarland, *Solar Energy Materials and Solar cell*, **77**, 229 (2003)
- [11] *J. Mater. Chem. A*, 2014, 2, 2648–2656
- [12] X. Han, K. Han, and M. Tao, *Electrochemical and Solid State Letters*, **12**, (4) 97 H89–H91 (2009)
- [13] X. Han, K. Han, and M. Tao, *Thin solid Films*, **518**, 5363-5367 (2010)
- [14] BRANDT, Iuri S. Propriedades relacionadas às vacâncias de Cu em filmes eletrodepositados de Cu₂O e Emissão de pares pósitron-eletron correlacionados de superfícies. Tese de doutorado. Departamento de Física, PPGF – UFSC, Florianópolis, (2013).
- [15] S. Pelegrini, Tese de Doutorado – Departamento de Física – UFSC (2014)
- [16] L. Wu, L-K Tsui, N. Swami, Giovanni Zangari, *J. Phys. Chem.* **114**, 11551 (2010)
- [17] N. Rubiano da Silva, Dissertação - Departamento de Física - UFSC (2012)
- [18] BRANT, Iuri S. Eletrodeposição de filmes finos de Cu₂O dopados com Co. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica – UFSC (2010)
- [19] RECCO, R. V.; PELEGRINI, S.; PLÁ CID C. C.; PASA A. A. Electrodeposition of semiconductor oxides. Departamento de Física, LFFS - UFSC, Florianópolis, (2016)

INVESTIGAÇÃO DAS GRANDEZAS QUE IMPACTAM NA VIDA ÚTIL DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Data de aceite: 19/06/2020
Data de Submissão: 18/03/2020

Giancarlo de França Aguiar

Instituto Federal do Paraná - IFPR -
Departamento de Matemática

Curitiba - Paraná - Brasil

<http://lattes.cnpq.br/6186868500737410>

Bárbara de Cássia Xavier Cassins Aguiar

Universidade Federal do Paraná - UFPR -
Departamento de Expressão Gráfica

Curitiba - Paraná - Brasil

<http://lattes.cnpq.br/4503060301357142>

INVESTIGATION OF GREATNESS THAT AFFECTS THE LIFE A POWER TRANSFORMER

RESUMO: Este trabalho ilustra um cenário dos sistemas de geração de energia e as suas principais preocupações. Apresenta a norma IEC 61850 e discute a importância da gestão no gerenciamento de ativos através do provimento de serviços de energia. Introduz comentários sobre transformadores de potência e investiga as principais grandezas que impactam na vida útil destes dispositivos de potência.

PALAVRAS-CHAVE: IEC 61850; Transformadores de Potência; Extensão da Vida Útil; Grandezas Monitoradas

ABSTRACT: This work illustrates a scenario of power generation systems and their main concerns. It presents the IEC 61850 standard and discusses the importance of management in the management of assets through the provision of energy services. Introduces comments on power transformers and investigates the main quantities that impact the useful life of these power devices.

KEYWORDS: IEC 61850; Power Transformers; Life Extension; Monitored Greatness

1 | INTRODUÇÃO

Com uma demanda crescente no provimento de energia elétrica, para a população, observa-se que é necessária a racionalização consciente e também um aumento de geração, transmissão e distribuição de energia. Dados do atlas de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2008), revelam que os trinta países que compõe a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico-OCDE¹ são historicamente os maiores consumidores de energia elétrica no mundo.

A Figura 1 ilustra os distintos volumes de consumo de energia primária em diversas

regiões mundiais em 2007.

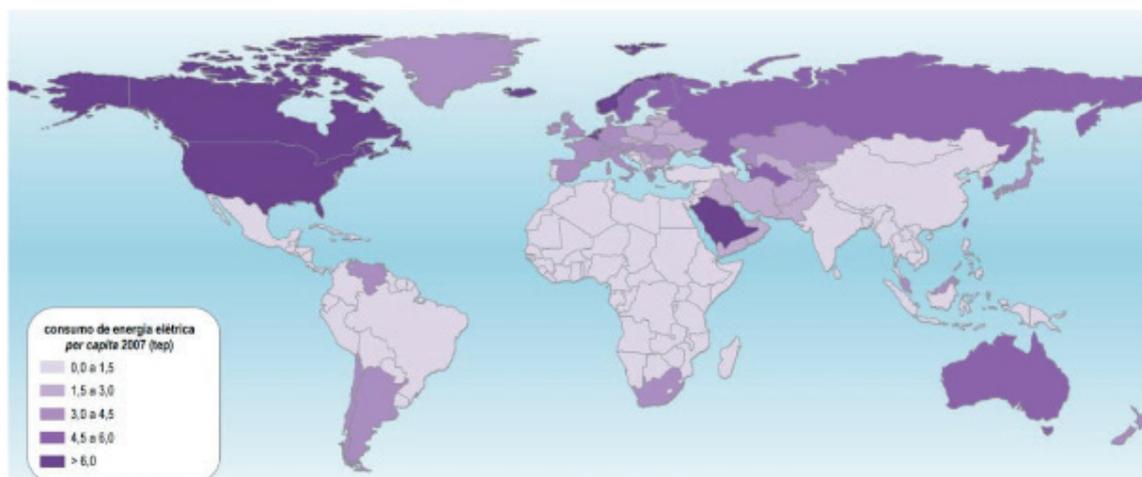


Figura: Consumo de Energia Elétrica Mundial Per Capita em 2007. Fonte: ANEEL, 2008

A forte disparidade entre os países neste consumo pode ser explicada pela estrutura econômica e social das nações. Na Alemanha e França o consumo de energia elétrica primária recuou 5,6% e 2,1%, respectivamente, entre 2006 e 2007. A Ásia Pacífica teve uma participação de 34,3% do total mundial e os Estados Unidos lideram o ranking como o maior consumidor respondendo por 21,3% do total mundial. O consumo nas Américas Central e do Sul revela-se de baixo a moderado (ANEEL, 2008).

Para Silva (2005), o setor energético nacional tem sofrido mudanças constantes e gerado elevado impacto para consumidores, indústrias e para as concessionárias de energia. Este cenário remete a necessidade da gestão, no setor energético, sob os aspectos econômico, ambiental, organizacional e tecnológicos.

Conforme Higgins *et al.* (2010), esta necessidade veio à tona devido a um conjunto de preocupações fundamentais:

1. Insegurança Energética: existe uma preocupação mundial quanto às fontes de energia renováveis (sua capacidade de suprimento) e à vulnerabilidade no fornecimento de energia elétrica.
2. Emissão de Gases e Efeito Estufa: estuda-se o aumento da substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. Entretanto, esta necessidade traz consigo a carência de novas tecnologias.
3. Competição Internacional: a preservação do meio ambiente depende diretamente da concorrência entre economias em desenvolvimento e mercados internacionais.
4. Mercado escasso (poucas concessionárias e geradoras): o pequeno mercado contribui para que a demanda seja elevada e por consequência os preços energéticos sejam elevados.
5. Desempenho dos prestadores de serviço (concessionárias): apesar de regulamentado (as empresas deveriam se esforçar para atender as elevadas expectativas de

1 Países da OCDE: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coreia, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Polónia, Portugal, República Eslovaca, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

desempenho com contenção de custos), o setor ainda possui monopólios.

Segundo Brand *et al.* (2004) e Petenel e Panazio (2012), as concessionárias de geração, distribuição e transmissão de fontes de energia, em geral, possuem equipamentos de diferentes gerações e distintos fabricantes, o que torna os sistemas de monitoramento, controle e gestão das plataformas automatizadas de subestações de energia elétrica, por exemplo, modelos de difícil comunicação. Nota-se que a grande maioria dos equipamentos possuem protocolos de comunicação muito particulares e com regras específicas.

Foi então em meados de 1990, nos Estados Unidos, que o projeto nomeado de *Utility Communications Architecture* (UCA) ganhou força no *Electric Power Research Institute* (EPRI). Esta pesquisa tinha como objetivo desenvolver um modelo de comunicação eficaz e comum a todos os fabricantes do setor energético. Paralelamente, um grupo de trabalho da *International Electrotechnical Commission* (IEC), conforme Gurjão *et al.* (2006), foi criado em 1995 para desenvolver uma padronização para os sistemas de comunicação em subestações. Percebendo que estavam trabalhando com um objetivo comum, os pesquisadores do EPRI e IEC reuniram esforços para desenvolver um padrão internacional conhecido como IEC 61850 *Communication Networks and Systems in Substation* ou Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações.

Atualmente, as concessionárias do setor energético realizam dentre muitas, as funções de gerador e consumidor das informações para o correto controle e manutenção dos equipamentos e sistemas de geração de energia. Entretanto, existem ainda diferenças marcantes entre os *Energy Management System* (EMS) ou sistemas de gerenciamento de energia e os *Substation Automation Systems* (SAS) ou sistemas de automação de subestações.

Segundo Kostic *et al.* (2003), embora trabalhem com os mesmos equipamentos físicos, eles operam em planos distintos no detalhamento das informações operadas, nos resultados de eficiência e desempenho e na responsabilidade dentro do controle de processos.

Objetivando aumentar a confiabilidade no controle desses processos, novos sistemas vêm sendo desenvolvidos. Os protocolos apontam ser mais restritivos (seletivos) e o número de informações enviadas das subestações aos centros de controle tendem a ser minimizadas.

Estudos da manutenção, conservação, monitoramento e diagnóstico da degradação e vida útil de equipamentos em concessionárias, como por exemplo, pesquisas com transformadores de potência, podem contribuir para uma reorganização dos sistemas utilizados em subestações de energia.

2 | GERENCIAMENTO DE ATIVOS

O mercado energético está cada vez mais competitivo, e as concessionárias objetivam promover seu crescimento combinando o aumento na geração (aliado a confiabilidade de transmissão e reduzidos investimentos no setor), a racionalização dos custos de operação e a rentabilização dos ativos presentes nestas operadoras.

A Figura 2 ilustra um modelo de gerenciamento de ativos, proposto por Silva (2005) na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP.

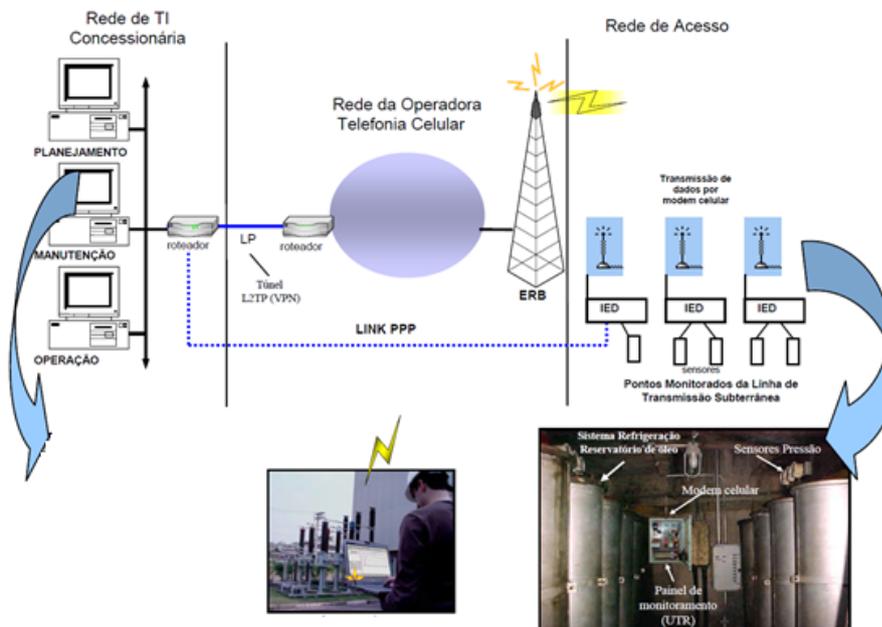


Figura 2: Sistema de Gerenciamento de Ativos na CTEEP. Fonte: Silva, 2005 (modificado)

Este modelo contém funções de controle e segurança estrutural em uma linha de transmissão subterrânea, como por exemplo, sensores de alagamento no sistema subterrâneo, sensores de pressão, painel de monitoramento, sensores de bomba de água, e também funções de supervisão do funcionamento da linha (sensores de tensão e corrente, pressão do óleo e temperatura dos cabos).

O gerenciamento de ativos significa a garantia de maior disponibilidade de equipamentos, com redução na variabilidade no processo de gestão, redução nos custos de manutenção e por consequência um aumento no tempo de controle, maior qualidade no processo de produção e redução nas perdas de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Desta forma foi inevitável para as empresas que almejavam ser competitivas, implementar soluções no gerenciamento de seus ativos. Entretanto, muitas operadoras do setor energético têm observado um acentuado envelhecimento de seus parques de equipamentos devido a necessidade de operação dos sistemas em condições críticas, o que por ocasião, acelera o seu envelhecimento adicional e provoca um encurtamento de sua vida útil.

As operadoras deste mercado vêm sofrendo com o elevado número de falhas em seus ativos (por exemplo, população de transformadores) e, portanto, são fundamentais as pesquisas de gestão da vida útil de equipamentos e técnicas de diagnóstico que permitam quantificar o estado de degradação destes equipamentos.

3 | TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Segundo Nynäs (2004), Silva (2005), Assunção (2007) e Segatto (2008), os

transformadores de potência são equipamentos de elevado custo, requerem manutenção especial e são essenciais dentro dos sistemas elétricos de potência. Fazem parte do corpo de ativos estáticos dentro das concessionárias e tem como funcionalidade principal a transferência de energia elétrica de um circuito para outro, nutrindo a mesma frequência e variando normalmente os valores de corrente e tensão.

São partes importantes no estudo de transformadores de potência: o núcleo (1), os enrolamentos (2), o tanque principal (3), o reservatório de expansão de óleo (4), as buchas (5), o comutador sob carga (6), o acionamento do comutador (7), os radiadores (8), o painel de controle (9), o secador de ar (10) e os termômetros (11). A Figura 3 abaixo mostra os principais componentes de um transformador de potência.

A Figura 3 ilustra os componentes principais de um transformador de potência.



Figura 3: Componentes de um Transformador de Potência. Fonte: Lorencini Brasil, Catálogo T.P.R.D., 1999

Harlow (2004), orienta que os transformadores de potência em geral variam de poucos a centenas de *Megavolt ampères* (MVAs), tendo elevado custo de implementação e se aproximando da casa de alguns milhões de dólares.

Em meados dos anos 70, algumas operadoras objetivando encontrar taxas de falhas e índices de desempenho em grandes transformadores, passaram a criar um banco de dados relatando as principais ocorrências em transformadores de potência. Entretanto foi na década de 80 com a publicação internacional do *Conseil International Des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ), que as investigações sobre a confiabilidade de transformadores tiveram um crescimento significativo (PENA, 2003 e LOPES, 2010).

Segundo Dietrich (1983), a publicação do CIGRÉ destacou-se por realizar a comparação em concessionárias de 14 países (Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Checa, Eslováquia, França, Finlândia, Itália, Japão, Suíça, Reino Unido, Estados Unidos e Rússia) e tornou-se referência em nível mundial. Este trabalho contou com uma análise de mais de 1000 falhas entre os anos de 1968 e 1978 em uma população de mais de 47.000 unidades/

anos estudando transformadores com idade inferior a 20 anos.

A Figura 4 ilustra um estudo da taxa de interrupções em 11.983 transformadores de potência em um período de 30 anos (1984 à 2014), na concessionária de energia elétrica CELG Distribuição no estado de Goiás/Brasil (MARQUES *et al.*, 2015).

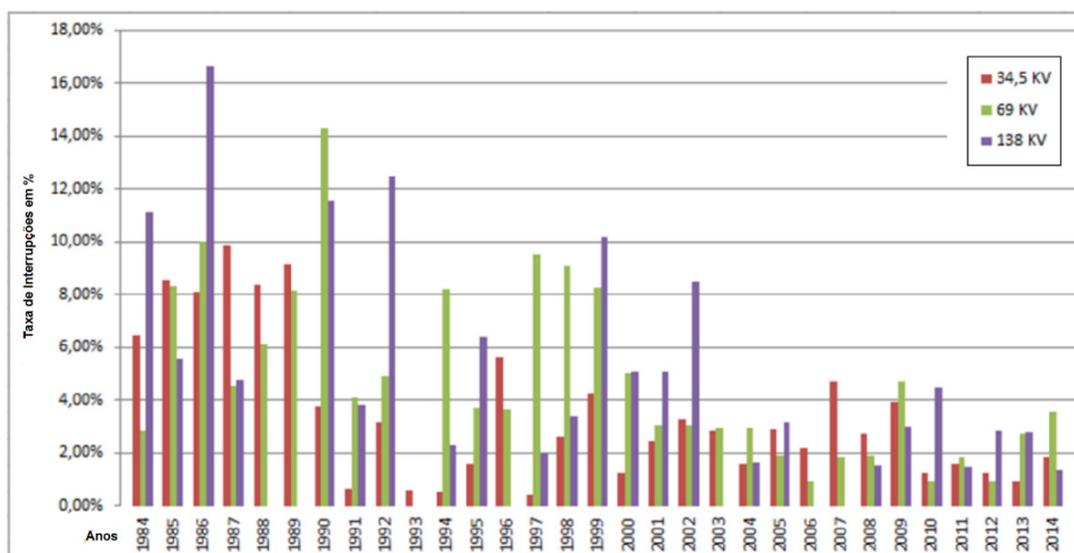


Figura 4: Taxa de Interrupções em Transformadores. Fonte: Marques et. Al., 2015 (modificado)

O estudo revelou que o maior número de interrupções acontece nos transformadores de 34,5 kV, sendo sua população de transformadores em número de 7.503, contra 2.816 transformadores de 69 kV e 1.664 transformadores de 138 kV. Os fabricantes estimam uma vida útil de 30 anos para os transformadores, entretanto, a pesquisa ilustrou que há equipamentos com idade superior ao recomendado. A maior taxa de interrupção em transformadores de 34,5 kV aconteceu em 1987 com aproximadamente 10% de interrupções, para os transformadores de 69 kV a maior taxa aconteceu em 1990 com aproximadamente 14% e para os transformadores de 138 kV a maior taxa foi no ano de 1986 com aproximadamente 17% de interrupções.

Contudo, não há unanimidade quanto a modelos que sejam precisos no cálculo da vida útil restante de transformadores, já que sua sobrevida, está apoiada em um conjunto muito vasto de variáveis. Para Martins (2009), as concessionárias enfrentam um previsível aumento na taxa de falhas em muitos de seus ativos e uma população de transformadores de potência se aproxima de seu final de vida útil.

Desta forma, torna-se fundamental o estudo e investigação na gestão de sua vida útil. Em geral, as taxas são elevadas nos primeiros anos de serviço e no final do seu tempo de vida, e portanto, modelos baseados na análise de risco, podem apoiar uma substituição estratégica de transformadores, contribuindo para um aumento da confiabilidade global dos sistemas de energia.

4 | GRANDEZAS QUE IMPACTAM NA VIDA ÚTIL DE UM TRAFÓ

Para Mamede (1993), Virayavanich (1996), Milan (1998), Richardson (1998), Chu (1999), Brites (2002), GT A2.23 (2005), Silva (2005), Assunção (2007), Badune (2013) e GT A2.05 (2013), como os transformadores são os dispositivos mais importantes e caros dentro de um sistema elétrico de potência, suas falhas inesperadas podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica e gerar uma consequente perda de confiabilidade junto a ANEEL e implicar no aumento de custos para as concessionárias e consumidores finais.

Diante deste cenário, o adequado funcionamento dos transformadores de potência é essencial para a operação dos sistemas elétricos, e portanto, muito têm-se pesquisado sobre as grandezas que impactam na sobrevida de transformadores de potência e na importância dessas grandezas para a modelagem de metodologias de previsão da vida útil de transformadores.

O Quadro 1 ilustra um conjunto de resumos dos subsistemas e suas funções de monitoramento, o Quadro 2 ilustra os subsistemas e as principais grandezas monitoradas em transformadores de potência.

Subsistemas	Funções de Monitoramento
Buchas	- Estado da Isolação das Buchas
Parte Ativa	- Envelhecimento da Isolação - Umidade na Isolação Sólida - Gás no Óleo - Previsão de Temperaturas - Previsibilidade Dinâmica de Carregamento - Simulações de Carregamento
Comutador sob Carga	- Supervisão Térmica - Desgaste do Contato - Assinatura do Mecanismo - Umidade e Temperatura no Óleo - Previsão de Manutenção do Comutador
Tanque de Óleo	- Umidade no Óleo
Sistema de Preservação do Óleo	- Integridade do Sistema de Preservação de Óleo
Sistema de Resfriamento	- Eficiência do Sistema de Resfriamento - Previsão de Manutenção do Sistema de Resfriamento

QUADRO 1. SUBSISTEMAS E FUNÇÕES DE MONITORAMENTO

Subsistemas	Grandezas Monitoradas
Buchas	- Capacitância ou Desvio Relativo de Capacitância - Tangente Delta
Parte Ativa	- Temperatura do Óleo - Temperatura dos Enrolamentos - Corrente nos Enrolamentos - Gás no Óleo
Tanque de Óleo	- Teor de Água no Óleo (ppm) - Saturação Relativa de Água no Óleo (%) - Saturação Relativa à Temp. Ambiente e de Referência - Ruptura da Bolsa do Tanque de Expansão
Comutador sob Carga	- Temperatura do Comutador - Corrente de Carga - Tensão de Linha - Posição de <i>Tap</i> - Monitoramento dos gases - Toque do Acionamento - Teor de Água no Óleo (ppm) - Saturação Relativa de Água no Óleo (%) - Saturação Relativa à Temp. Ambiente e de Referência
Sistema de Resfriamento	- Corrente de Ventiladores ou Bombas - Vibração de Bombas
Outros	- Temperatura Ambiente

QUADRO 2. SUBSISTEMAS E FUNÇÕES DE MONITORAMENTO

A Tabela 1 ilustra um resumo dos componentes monitorados e os principais aspectos que causam as maiores taxas de falhas em transformadores de potência.

Componentes Monitorados	Causas de Falhas	Falhas Detectadas	Acompanhamento
Enrolamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de temperatura acima dos limites - Forças radiais e axiais - Descargas parciais - Curto circuito entre espirais, bobinas e enrolamentos 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslocamento do próprio enrolamento ou de suas espiras - Afrouxamento do enrolamento 	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeções visuais internas - Medida das variações dos parâmetros - Método da programação da onda - Análise em frequência - Medida da reatância - Medida das vibrações
Buchas	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de temperatura acima dos limites - Contaminação por umidade - Descargas parciais 	<ul style="list-style-type: none"> - Envelhecimento do material das gaxetas - Formação de bolhas - Aquecimento em flanges metálicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Supervisão do nível de óleo - Inspeções visuais externas - Medições da tangente delta e capacitância - Análises do gás produzido
Chaves Comutadoras	<ul style="list-style-type: none"> - Falhas no dielétrico - Falta de alinhamento dos contatos - Mudança excessiva do <i>tap</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Erosão dos contatos - Desgaste entre os contatos fixos e móveis 	<ul style="list-style-type: none"> - Medição da corrente ou torque do motor do mecanismo - Temperatura dos fluídos - Supervisão vibro-acústica

TABELA I: ASPECTOS QUE CAUSAM TAXAS DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

É possível verificar nos Quadros 1 e 2, e na Tabela 1, que as buchas e comutadores sob carga são dispositivos com grande influência dentro da investigação do ciclo de vida útil de transformadores de potência.

A Tabela 1 cita, por exemplo, algumas causas de falhas em comutadores sob carga: falhas no dielétrico, falta de alinhamento em contatos e mudança excessiva do *tap*. Descreve também as falhas detectadas em inspeções monitoradas: erosão dos contatos, desgaste entre os contatos fixos e móveis. E relata as medidas de acompanhamento do dispositivo:

medição da corrente ou torque do motor do mecanismo, temperatura dos fluidos e supervisão vibro-acústica do equipamento.

5 | CONCLUSÕES

Este trabalho ilustrou um cenário dos sistemas de geração, distribuição e transmissão de energia, discutindo as suas preocupações principais. Abordou e discutiu a normatização IEC 61850 e a sua importância na gestão de ativos. O trabalho justificou o estudo de transformadores de potência, por meio de pesquisa das principais grandezas que impactam em sua vida útil.

O controle de ativos garante um acréscimo na disponibilidade de equipamentos e reduz a variabilidade em processos de gestão e custos com manutenções desnecessárias. Algumas consequências imediatas são o aumento no tempo de controle, maior qualidade no processo de produção e redução nas perdas de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

1. ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª ed., Parte 1 (Energia no Brasil e no Mundo), cap. II, pág. 41, 2008.
2. ASSUNÇÃO, T. C. B. N. Contribution to modeling and Power Transformer Ageing Analysis. Doctoral Thesis, Graduate Program in Electrical Engineering, UFMG, 2007.
3. BRAND, K. P.; BRUNNER, C.; WIMMER, W. Design of IEC 61850 based substation automation systems According to customer requirements. CIGRE, Session B5-103, 2004.
4. BRITES, J. Automation System for Transformer Management Based on Reliability. Doctoral Thesis, Polytechnic School of USP, São Paulo, 2002.
5. CHU, D.; LUX, A. On-line Monitoring of Power Transformers and Components: A Review of Key Aspects. In Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference Proceedings, 26-28, oct. 1999.
6. DIETRICH, W. et al CIGRE Working Group 05. An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service. Journal Electra, n. 88, 1983.
7. GCOI-CDE Equipment and Installation Performance Fee. Technical Report: Statistical Analysis Transformers Performance 1996.
8. GT A2.23. Management Power Transformers Data History. Task force FT-01, Quantities List Monitored in Transformers - CIGRE Brazil, Rio de Janeiro, August 2005.
9. GT A2.05. Maintenance Guide for Power Transformers. CIGRE Brazil, Working Group A2.05, 2013.
10. GURJÃO, E. C.; CARMO, U. A.; SOUZA, B. A. Communication Standard aspects IEC 61850 BRAZILIAN SYMPOSIUM ON ELECTRICAL SYSTEMS, 2006.

11. HARLOW, J. H. Transformer Electric Power Engineering. CRC Press LLC, Florida, USA, 2004.
12. HIGGINS, N.; Vyatkin, V.; NAIR, N. K. C.; SCHWARZ, K. Distributed Power System Automation With IEC 61850, IEC 61499, and Intelligent Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications Reviews end 2010.
13. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61850-1 Communication Networks and Systems in Substations Part 1: Introduction and Overview. IEC, p. 36-38, 2003.
14. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61850-6 Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs - Part 6, IEC, Tech. Rep. 2009.
15. KOSTIC; PREISS, O.; FREI, C. Towards the formal integration of two upcoming standards: IEC 61970 and 61850 Power Engineering, 2003 Large Engineering Systems Conference, p. 5-11, 2003.
16. LOPES, Y. SmartFlow: Autoconfigurável system to IEC 61850 Telecom networks with OpenFlow framework. Thesis, Universidade Federal Fluminense, UFF, 2013.
17. LOPES, J. I. Risk Management Methodology in Operation and Maintenance of Power Transformers. Masters dissertation. Graduate Program in Electrical Engineering, UFMG, 2010.
18. MAMEDE, J. Electrical Equipment Manual. Vol 2, Rio de Janeiro:. Scientific technical publisher Books Ltd, 1993.
19. MARQUES, A. P.; MOURA, N. K.; AZEVEDO, C. H. B.; SANTOS, J. A. L.; BRITO, L. C.; GUIMARÃES, I. L. B.; SILVA, T. H. V.; RIBEIRO, C. J. Estudo sobre Transformadores de Potência: Parte I. 12º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão – CONPEEX, UFG, Goiânia, 2015.
20. MARTINS, M. A. G. Management Life of Transformers. Science & Technology of Materials, vol. 21, no. 3/4, 2009.
21. MILAN, M. Transformer Maintenance Liquid Insulation. 5th ed. São Paulo: Editora Ltda Egar Blücher, 1998.
22. NYNAS, N. Transformer Oil Handbook. 1 d, Sweden:. Linderoths in Vingaker, 223 p., 2004.
23. PENA, M. C. C. Failures in Power Transformer: A Contribution to analysis, definitions, causes and solutions. Masters dissertation. Federal University of Itajubá - UNIFEI 2003.
24. PETENEL, F.; PANAZIO, C., analysis of a Smart Grid network using the IEC 61850 standard and measurement data. Brazilian Telecommunications Symposium - SBrT'12, Brasília, DF, 2012.
25. RICHARDSON, B. Transformer Life Management, Bushings and Tapchangers. In: IEE Colloquium, oct. 1998.
26. SEGATTO, E. C.; COURY, D. V. Neural Networks Applied to Differential Relay for Power Transformers. Sba: Control & Automation, vol. 19, paragraph 1, Christmas, Mar. 2008.
27. SILVA, H. A. P. Power of Asset Management Using System Monitoring and Diagnostics. Master's thesis, Inter Program Graduate units in Energy, Polytechnic School of USP, 2005.
28. VIRAYAVANICH, S.; SEILER, A.; HAMMER, C.; WECK, KH Reliability of On-Load Tap Changers with Special Consideration Experience with Delta Connected Transformer Windings and Tropical Environmental Conditions. In: CIGRE Conference, 1996.
29. LORENCINI, BRASIL. Constructive characteristics of Power Transformers. Catalog Power Transformers

and Reactors Shunt, 1999. Available at: <http://www.lorencinibrasil.com.br/blog/caracteristicas-construtivas-dos-transformadores-de-potencia/>. Accessed: 20/07/2015.

NOVA ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE DATACENTERS - O ÍNDICE EUED (ENERGY USAGE EFFECTIVENESS DESIGN)

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 02/03/2020

Alexandre Fernandes Santos

Universidade Beira Interior, Rua Marquês d'Ávila e Bolama, 6201-001, Covilhã, Portugal.

<https://orcid.org/0000-0001-5306-6968>

Pedro Dinis Gaspar

University of Beira Interior, Rua Marquês d'Ávila e Bolama, 6201-001, Covilhã, Portugal

3 C-MAST - Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

<https://orcid.org/0000-0003-1691-1709>

Heraldo José Lopes de Souza

Fapro – Faculdade Profissional.

Curitiba - Paraná

<https://orcid.org/0000-0002-8471-7804>

RESUMO: Até 2021, mais de 90% dos grandes data centers revisarão suas estratégias devido às tendências socioeconômicas e ambientais globais. Com o crescimento dos DCs, um dos principais desafios é melhorar o desempenho e a eficiência, em grande parte devido ao calor dissipado pelos servidores, enquanto o enorme número de equipamentos instalados para aumentar a capacidade de armazenamento também aumenta

consideravelmente conta da energia elétrica e, conseqüentemente, a dissipação de calor. Para melhorar a dissipação de calor, alguns DCs até se mudaram para lugares onde a temperatura média do ar é mais baixa, lugares como o Círculo Polar Ártico ou a Suécia, para obter melhor eficiência energética no processo de resfriamento. A eficiência energética, com alto consumo de energia, é um local importante. Existem metodologias para medir essa eficiência, um exemplo é o uso do índice PUE (Power Usage Effectiveness). Neste artigo é proposto um novo índice para medir a eficiência na fase de projeto, o EUED (Design de Eficácia no Uso de Energia). Este índice permite avaliar sistemas usando “free cooling” e sistema adiabático. Uma comparação é realizada considerando o equipamento na pior situação. O parâmetro termodinâmica entalpia é usado para calcular os resultados. Essa nova metodologia permite determinar diferenças entre as cidades de São Paulo e Curitiba (1,21%) e entre o Rio de Janeiro e Curitiba (10,61%). Os valores do índice EUED foram de 1.245 kW / kW para Curitiba, 1.260 kW/kW para São Paulo e 1.377 kW/ kW para o Rio de Janeiro, respectivamente, atingindo uma diferença de 16,86% para Curitiba, 16,19% para São Paulo e 10,31% para o Rio de Janeiro em relação ao PUE

COA (Eficiência no uso da energia, ar externo constante). A vantagem do EUED é que ele trabalha com as 8.760 horas na fase de projeto, usando elementos psicométricos para determinar quando usar o sistema de refrigeração e evaporação livres e, mais importante, variando o COP de acordo com as características ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Data Centers, PUE, EUED, Índices de desempenho, Refrigeração do data center.

NEW METHODOLOGICAL APPROACH FOR ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF DATACENTERS - THE EUED INDEX (ENERGY USAGE EFFECTIVENESS DESIGN)

ABSTRACT: By 2021, more than 90% of large data centers review their strategies due to global socio-economic and environmental trends. With the growth of DCs, one of the main challenges is to improve performance and improve, largely due to the heat dissipated by the servers, while the number of huge equipment is used to increase the storage capacity also considerably increases the electricity and, consequently, a heat dissipation. To improve heat dissipation, some DCs even move to places where the average temperature is lower, such as the Arctic Circle or Sweden, for better economic efficiency in the cooling process. Energy efficiency, with high energy consumption, is an important place. There are methodologies to measure this efficiency, one example is using the PUE (Power Usage Effectiveness) index. In this paper is proposed a new index for measuring efficiency at the design stage, the EUED (Energy Usage Effectiveness Design). This index allows to evaluate systems using “free cooling” and adiabatic system. A comparison is performed considering the equipment in the worst situation. The thermodynamics parameter enthalpy is used to calculate the results. This new methodology allows to determine differences between the cities of São Paulo and Curitiba (1.21%) and between Rio de Janeiro and Curitiba (10.61%). The values for the EUED index were 1.245 kW/kW for Curitiba, 1.260 kW/kW for São Paulo and 1.377 kW/kW for Rio de Janeiro, respectively, reaching a difference of 16.86% for Curitiba, 16.19% for São Paulo and 10.31% for Rio de Janeiro in relation to PUE COA (Power Usage Effectiveness Constant Outdoor Air). The advantage of the EUED is that it works with the 8,760 hours in the design phase, using psychometric elements to determine when to use free cooling and evaporative system, and more importantly varying the COP according to environmental characteristics.

KEYWORDS: Data Centers, PUE, EUED, Performance indexes, Data Center Cooling.

1 | INTRODUÇÃO

Num Datacenter, as principais fontes de crescimento, o Cisco Global Cloud Index, projeta um crescimento de 3,3 vezes no tráfego global de data center até 2020. Isso equivale a 15,3 zettabytes (ZB) por ano em um tráfego global de data center até 2020. Desse tráfego, da nuvem virão 92% até 2020. O número de datacenters em hiperescala aumentará de 259 no final de 2015 para 485 em 2020. Isso representa 47% de todos os servidores de datacenter instalados até 2020. Compreender as mudanças arquitetônicas em torno do movimento de hiperescala é crítico, tanto como fornecedor e como cliente corporativo, para atender melhor à crescente demanda por maior desempenho (RS-online, 2018).

Com a crescente expansão dos sistemas corporativos, estão migrando para as nuvens. Esses sistemas baseado em nuvem, expandam-se muito rapidamente e eficiente, suportando mais cargas de serviços do que os sistemas tradicionais. De acordo com a análise realizada pela Cisco, a nuvem dominará e excederá o crescimento do DC tradicional até 2020, quando 92% da carga de trabalho será processada pelo DC da nuvem e 8% pelos DCs tradicionais (Cisco, 2016). Além disso, até 2020, US \$ 298 milhões em dólares ou 68% da carga de trabalho em nuvem serão colocados em data centers públicos, em comparação com US \$ 66,3 milhões ou 49% registrados em 2015, uma taxa de crescimento anual composta de 35% entre 2015 e 2020. Recursos como Internet of Things (IoT) e Big Data impulsionarão o mercado. A IoT será um grande gerador de dados, atingindo 600 ZB por ano até 2020, 275 vezes maior que o tráfego projetado entre DCs e dispositivos / usuários finais (2,2 ZB) - 39 vezes maior que o tráfego total de DCs (15,3 ZB). O Big Data já está impulsionando o crescimento geral do armazenamento de dados. Os dados armazenados nos datacenters aumentarão cinco vezes até 2020, atingindo 915 Exabyte (EB) - um aumento de 5,3 vezes (uma taxa de crescimento anual composta de 40%) em relação ao nível 171 de EB em 2015.

Até 2021, mais de 90% dos grandes data centers revisarão suas estratégias devido às tendências socioeconômicas e ambientais globais. (Cisco, 2016). Com o crescimento dos DCs, um dos principais desafios é melhorar o desempenho e a eficiência, em grande parte devido ao calor dissipado pelos servidores, enquanto o enorme número de equipamentos instalados para aumentar a capacidade de armazenamento também aumenta consideravelmente conta da energia elétrica e, conseqüentemente, a dissipação de calor. Para melhorar a dissipação de calor, alguns DCs até se mudaram para lugares onde a temperatura média do ar é mais baixa, lugares como o Círculo Polar Ártico ou a Suécia, para obter melhor eficiência energética no processo de resfriamento.

As métricas de eficiência são definidas e padronizadas para comparar a eficiência dos sistemas DCs e seus custos operacionais. Um consórcio global de fabricantes de equipamentos de TI, empresas de tecnologia, governo, instituições de ensino e pesquisa e desenvolvimento, associações de classe e outros setores da sociedade também foi criado para discutir, desenvolver e recomendar as melhores práticas de eficiência energética, juntamente com as emissões de CO₂. Uma dessas métricas é a PUE (*Power Usage Effectiveness*), definida pelo *The Green Grid*, como um instrumento para medir a eficiência energética de um DC. O parâmetro é a proporção da energia total consumida por um DC e a energia fornecida ao equipamento de TI. O valor PUE ideal seria 1,0. Já existem casos relatados de DCs com PUE = 1,02 (Green Grid, 2012); (Saylor et al, 1988).

O consumo elétrico de um DC, chega a um consumo de 25 a 50 vezes mais do que um escritório normal com a mesma área. O consumo de energia aumentará 85% na Europa até 2020. No entanto, um estudo mostrou que a taxa de crescimento de energia nos DCs não foi tão alta quanto o esperado devido à virtualização e à crise econômica nos USA e na Europa (Covas et al, 2013).

Organizações como a *Green Grid*, a ASHRAE e a Agência de Proteção Ambiental dos USA adotaram a métrica PUE para avaliar a eficiência energética da infraestrutura de DC.

Essa métrica é uma relação entre a energia total consumida por um DC e a fração da energia consumida pela infraestrutura de TI. O resultado é sempre maior ou igual a um, onde o DC será mais eficiente. Algumas organizações, por exemplo, a Comissão Europeia usam o inverso da PUE, chamada métrica DCiE (*Data Center infrastructure Efficiency*). O uso geral de energia de um data center em relação ao uso de energia de equipamentos e infraestrutura de TI também pode ter efeitos positivos no uso de energia. No entanto, os DCs precisam ser cada vez mais eficientes e ecológicos, o que exige reduzir a energia necessária para executar as infraestruturas de TI, garantir a longevidade do sistema e garantir o consumo de energia de fontes renováveis nas fontes de energia.

A eficácia do uso de carbono (CUE) (Green Grid, 2012) trata das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas às operações de uma DC; A Eficácia no Uso da Água (Green Grid, 2012) trata do uso de água nos DC, incluindo a água usada para umidificação e a água evaporada no local por energia produzida ou resfriada pelo DC e seus sistemas de suporte. A *Green Grid* também desenvolveu a métrica ERE (*Energy Reuse Effectiveness*) para medir o benefício de reutilizar a energia produzida em DC em outras infraestruturas externas. A métrica *Compute Power Efficiency* procura quantificar a eficiência total de um DC, levando em consideração o fato de que nem toda a energia elétrica fornecida ao equipamento de TI é transformada por esse equipamento em um produto de trabalho útil (Covas et al, 2015). O Google é totalmente sem carbono há mais de uma década e, em 2018, correspondemos a 100% do consumo de eletricidade de nossas operações globais com energia renovável pelo segundo ano consecutivo (Google, 2019).

O fornecimento de resfriamento gratuito em uma fonte de alimentação CC típica é projetado principalmente para uma infraestrutura de TI e um sistema de resfriamento, preparado para remover o calor gerado em equipamentos de TI. Esta fonte de alimentação varia de acordo com as especificações do DC e do sistema de refrigeração instalado. Dependendo da configuração dos economizadores e das condições climáticas locais, o uso de energia do sistema de refrigeração varia (AHRTI, 2012). Um economizador pode ser construído de maneira simples como um conjunto de amortecedores, o que permite misturar o ar externo (de renovação) com o ar de recirculação quando esse ar possui características termodinâmicas favoráveis ao seu uso como ar de descarga. O ar externo em condições favoráveis de temperatura e umidade (valores baixos de temperatura e umidade) pode reduzir a carga térmica no sistema de resfriamento quando comparado ao ar recirculado (Khalaj et al, 2018). Os DCs possuem economizadores de ar para distribuir diretamente o ar ambiente após ajustar seus níveis de umidade e poluentes de acordo com a norma (ASHRAE, 2011). No entanto, economizadores de ar indiretos usam ar ambiente frio para resfriar o ar de retorno de corrente contínua e redistribuí-lo em corrente contínua. Nesse processo, umidificador, desumidificador, filtros, rodas de calor, tubos de calor, resfriadores evaporativos diretos e indiretos, dependendo do tipo de economizador, podem ser usados. Como o consumo de energia, o desempenho térmico e o custo final de resfriamento são altamente dependentes das condições climáticas locais, os economizadores mencionados acima foram simulados com resfriadores resfriados a ar e a água. Um sistema de energia

renovável normalmente converte energia eólica, luz solar, ondas do mar, queda de água, biomassa e calor geotérmico em eletricidade utilizável ou energia térmica. No entanto, a integração e a implantação em larga escala desses recursos na rede podem ter impactos técnicos, econômicos, ambientais e sociais substanciais. As baterias também são um meio eficiente de armazenar a energia excedente fornecida por módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas. Essa energia excedente pode ser armazenada em bancos de baterias e extraída deles quando a energia total gerada por fontes de energia renováveis é insuficiente (Khalaj et al, 2018).

Várias métricas anuais foram sugeridas para superar os desafios de eficiência energética e gerenciamento térmico. O desempenho dos datacenters no gerenciamento térmico (Costa et al, 2014). As questões atuais de eficiência energética e gerenciamento térmico são discutidas os resultados analisados, em relação à eficácia relativa das várias métricas, conforme mostrado na Tabela 1.

Apesar do desenvolvimento de várias métricas para avaliar a eficiência de DC, nenhuma métrica foi proposta para avaliar simultaneamente o impacto das mudanças no nível central e no nível do rack (ou seja, infraestrutura e equipamentos de TI) na eficiência energética.

A métrica mais usual (PUE) é limitada devido à infraestrutura e às cargas de TI que aparecem no denominador da expressão. Assim, se forem feitas melhorias no uso de energia de equipamentos de TI sem alterações simultâneas no uso de energia da infraestrutura, o valor métrico da PUE aumentará de fato. Devido aos desafios e limitações das métricas existentes, o trabalho futuro a ser desenvolvido deve se concentrar no desenvolvimento de uma métrica para avaliar com mais eficiência a eficiência energética e o impacto das alterações no data center. Isso permitiria aos tomadores de decisão de nível superior avaliar os resultados com base em uma única métrica, em vez de exigir a medição, análise e avaliação de um conjunto de métricas. Essa abordagem seria mais direta e econômica e reduziria potencialmente o efeito de avaliar os resultados das métricas concorrentes. Esses data centers representam, portanto, uma carga energética significativa, que, por sua vez, deve ser gerenciada por meio de novas tecnologias e estratégias de controle (Lajevardi et al, 2014).

Conforme Beitelmal et al, documentou a eficácia de um data center. A métrica *Power Use Efficiency* (PUE) é uma ferramenta de referência usada para analisar a infraestrutura de um datacenter em relação à carga de TI existente. Uma taxa de PUE de 2,0 indica que o equipamento de TI utiliza cerca de 50% da energia medida do edifício e o restante é usado para refrigeração e outros recursos de suporte. Outras métricas foram propostas para avaliações de desempenho em nível de rack; por exemplo, “Índice de calor de suprimento (SHI)”, é uma métrica que foi introduzida como um parâmetro adimensional que ajuda a quantificar a quantidade de calor infiltrado no ar resfriado fornecido a um rack” (Beitelmal et al, 2014). Essa métrica é a relação entre aumento da entalpia devido à infiltração de calor na entrada do rack e aumento da entalpia na saída do rack, com uma análise detalhada para desenvolver a relação composta entre os parâmetros geométricos e a carga de alimentação. Uma correlação entre a métrica SHI e a eficiência energética geral do O datacenter ainda não foi documentado. O trabalho de pesquisa torna-se necessário para levar essa e outras

métricas usadas para análise de energia do datacenter. Por exemplo, as variáveis usadas para calcular a métrica PUE podem ser difíceis de medir se o DC estiver em um edifício de uso misto Além disso, a métrica é simples e não fornece o conhecimento técnico necessário para uma análise de engenharia adequada. Por exemplo, se todos os servidores em um datacenter estiverem inativos e não Para produzir qualquer trabalho, embora os recursos de refrigeração sejam bem provisionados, a energia consumida por outros recursos de suporte e suporte será de apenas 20% da energia de TI, perfeito 1,2. Neste exemplo, a métrica PUE indica que o DC está muito bem otimizado, no entanto, o datacenter está desperdiçando energia, pois nenhum trabalho está sendo feito (Beitelmal et al, 2014).

Conforme um memorando público criado, que trata de um acordo alcançado pela Força-Tarefa de Harmonização de Métricas Globais sobre abordagens padrões e convenções de relatórios para Produtividade Energética de Data Center (DCeP). Os proprietários e operadores de DC avaliam e melhoram o desempenho de seus equipamentos com métricas de eficiência energética. Este acordo recomenda quantificar o trabalho útil.

A definição de Beitelmal et al, um sistema termodinâmico como um servidor na escala local e como um data center na escala global, as métricas de eficiência energética abrangem a relação entre a energia dinâmica (a energia proporcional ao uso do sistema) e a energia total consumida pelo sistema. A amostra de um único servidor e de um datacenter foi apresentada para determinar a métrica de eficiência energética de cada caso. Os resultados dessa análise mostram que a eficiência aumenta com o aumento da utilização da CPU e é maior para um servidor com vários processadores do que para um servidor com um único processador. Essa condição ocorre devido à energia inativa tende a reduzir a eficiência geral do servidor, portanto, a consolidação de processadores na mesma plataforma de servidor minimizaria esse efeito. O estudo de caso de DC é conduzido em um cenário hipotético de datacenter, no qual a energia estimada dos recursos de refrigeração é calculada usando o sistema de chiller. O trabalho nessas métricas de desempenho energético é necessário para desenvolver métodos padronizados para avaliar e classificar servidores de dados e datacenters heterogêneos com base em sua utilização e consumo reais (Beitelmal et al, 2014).

Com o crescimento dos negócios, uma operadora de telecomunicações portuguesa considerou a construção de um novo DC em Portugal com 12.000 m² de espaço em branco e 40 MW de eletricidade. A instalação em termos de eficiência energética significa que o DC deve ter um PUE igual ou menor que 1,25. Este será o maior DC construído em Portugal e o seu projeto deve ser utilizado como referência não apenas em termos de eficiência energética, mas também de sustentabilidade. Encontrar o local mais satisfatório para alcançar os objetivos econômicos, ambientais e de risco (Covas et al, 2013).

Segundo Covas et al., As complexidades dos DCs em infraestrutura técnica e organizacional que garantem o melhor desempenho e a mais alta confiabilidade nos modernos sistemas de informação e comunicação. Foi proposta uma abordagem de análise de decisão multicritério (MCDA), identificando os locais mais sustentáveis para as instalações de DC, levando em consideração aspectos técnicos, sociais, econômicos, ambientais e ambientais.

As avaliações dos DCs em Portugal foram realizadas com base em pesquisas e entrevistas escritas, para estimar a potencial perda de oportunidade em termos de economia de energia devido à sua localização. Avaliando o desempenho ambiental dos DCs, levando a uma revisão da literatura para compilar as métricas utilizadas. Essas métricas são apresentadas na Tabela 1 (ASHRAE, 2013).

O PUE foi adotado como um guia métrico para avaliar a eficiência dos DCs. No entanto, o uso da métrica PUE mostrou algumas preocupações entre analistas e projetistas especializados de uma DC, uma vez que concluíram que ela não promoveu práticas de eficiência energética.

Critério: Foram considerados dois DCs em dois locais diferentes com os mesmos sistemas (TI, distribuição de energia, geradores, UPS, etc.), mas com sistemas de refrigeração diferentes. Sendo um dos DCs, o clima é mais quente, mas eles têm o mesmo PUE. Isso significa que suas infraestruturas de refrigeração (todas as outras iguais) estão usando as mesmas quantidades de energia, o que significa que, na métrica PUE, elas podem ser consideradas igualmente eficientes. No entanto, um DC localizado em um clima muito frio, como no Ártico, aproveitando o resfriamento externo gratuito, em vez de um DC localizado em um clima mais quente, como Portugal. Com essa temperatura mais baixa, seria mais eficiente no consumo de energia DC localizado na região quente. Como as empresas proprietárias nunca consideraram construir um DC no Ártico, onde não imaginavam seus funcionários morando perto de DC, e que outros funcionários, incluindo clientes do DC, poderiam facilmente visitar o DC para manutenção ou outras operações. Vendo a imagem pública da empresa, não construindo seus empreendimentos em outros países (ASHRAE, 2013).

A bibliografia de referência da ASHRAE discute que o resfriamento livre tem conexão com a redução do PUE, também demonstrou uma redução média de 2,0 do PUE para até 1,5 usando o resfriamento livre. O PUE pode ser calculado usando medições de energia (kilowatt-hora) ou potência (kilowatt). As medições de energia são mais precisas porque as medições de potência apenas amostram o fluxo de energia no momento exato da medição, enquanto as medições de energia acumulam o fluxo de energia ao longo do tempo. As estimativas de PUE pela primeira vez geralmente usam amostras baseadas em energia, refletem com mais precisão o uso de energia a longo prazo e agora são preferidas pelo setor. A maioria dos sistemas de monitoramento pode ser configurada para relatar energia (Rasmussen, 2012).

Métricas	Iniciais	Definições
Power Usage Effectiveness Eficácia do uso de energia	PUE	$\frac{\text{Energia total instalado}}{\text{IT Energia equipamento}}$
Datacenter Infrastructure efficiency Eficiência da infraestrutura do datacenter	DCiE	$\frac{1}{\text{PUE}} \cdot 100$
Carbon Usage Effectiveness Eficácia do uso de carbono	CUE	$\frac{\text{CO}_2 \text{ emitido (kgCO}_2\text{eq)}}{\text{Unidade energia (kWh)}} \cdot \text{PUE}$
Water Usage Effectiveness Eficácia no uso de água	WUE	$\frac{\text{Uso anual de água no local}}{\text{IT Energia equipamento}}$
Energy Reuse Effectiveness Efetividade de Reutilização de Energia	ERE	$(1 - \frac{\text{Energia reutilizado}}{\text{Energia total}}) \cdot \text{PUE}$
Compute Power Efficiency Computar eficiência de energia	CPE	$\frac{\text{IT Uso do equipamento}}{\text{PUE}}$
Power Overhead Multiplier Multiplicador de sobrecarga de energia	SI-POM	$\frac{\text{DC Consumo de energia no medidor}}{\text{Consumo total de hardware vinculado IT}}$
Hardware Power Overhead Multiplier Multiplicador de sobrecarga de potência de hardware	H-POM	$\frac{\text{Cargas de máquinas conectadas AC}}{\text{Carregando computadores}}$
Deployed Hardware Utilization Ratio Taxa de utilização de hardware implantada	DH-UR	$\frac{\text{N}^\circ \text{ Servidores Rodando Aplicativos}}{\text{Total de servidores realmente implantado}}$
Corporate Average Datacenter Efficiency Eficiência média corporativa do datacenter	CADE	Instalação eficiente · Eficiência de ativos de TI
Temperature of the region usage effectiveness Temperatura da eficácia do uso da região	TRUE	$\frac{\text{IT eq. energia+iluminação+outros}}{\text{IT Energia Equipamentos}} + \text{Cf} \cdot \frac{\text{Energia sistema de refrigeração}}{\text{IT Energia Equipamento}}$

Tabela 1 - Métricas para datacenters (ASHRAE, 2013).

Riscos sísmico, disponibilidade de energia, com foco exclusivo em áreas de maior impacto, são fatores que não estão incluídos nesta pesquisa Um DC típico (com PUE = 2,1) tem a distribuição do consumo de eletricidade mostrado na Figura 1 (ASHRAE, 2013).

Consumo de eletricidade em Datacenters

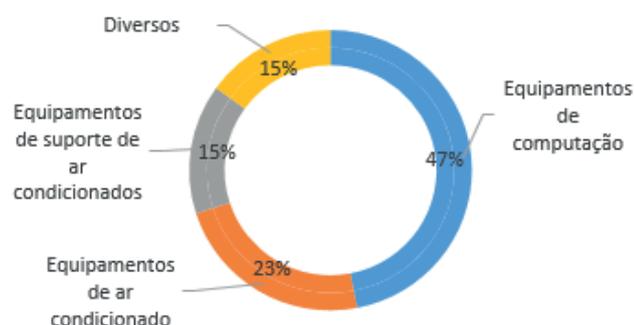


Figura 1 - Distribuição do consumo de eletricidade em um DC típico (Ramussen, 2012).

Em um DC típico, exceto pelos 47% dos 53% restantes de consumo de energia elétrica utilizados nos equipamentos de TI, o sistema de ar condicionado é responsável por 38% do consumo total de eletricidade. A TI e o ar condicionado correspondem a cerca de 72%

de todo o consumo elétrico na infraestrutura, Figura 1. Como a ênfase deste trabalho não é direcionada à eficiência dos equipamentos de informática, a ideia é usar um índice de desempenho que possa ajudar os investidores a ter o suporte necessário para decidir o local mais adequado para a instalação de um DC, usando um ábaco com elementos simples e básicos. Segundo a Ernts & Young, os executivos precisam “Aumentar a velocidade da tomada de decisão e a eficiência da execução do projeto para aproveitar as janelas de oportunidade” (AHRTI, 2012). Uma dessas métricas é a eficiência de uso de energia (PUE), definida pelo *The Green Grid* como um instrumento para medir a eficiência energética de um DC. Este parâmetro é a proporção da energia total consumida por um DC e a energia fornecida ao equipamento de TI. O valor PUE ideal seria 1,0. Já existem casos relatados de DC com PUE = 1,02 (E. Y., 2015).

A pesquisa propõe, uma nova abordagem metodológica para avaliação da eficiência energética de datacenters - o índice EUED (Energy Usage Effectiveness Design). Essa métrica enfatizará as características ambientais externas do DC, estudando as características climáticas e geotérmicas. Assim, um estudo pré-projeto usando índices naturais pode acelerar a tomada de decisão, considerando o local mais apropriado para um DC, ou seja, utilizando um índice envolvendo quatro elementos. Na correlação, o índice proposto para tomada de decisão utiliza os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar do bulbo seco;
- Temperatura do ar do bulbo úmido;
- Temperatura do solo (geotérmica);
- Temperatura do ar no ponto de orvalho.

O EUED enfatiza as características ambientais externas do DC, como o PUE. Além do PUE, as Diretrizes Térmicas para Ambientes de Processamento de Dados já possuem algumas simulações para o uso do “*Free cooling*” em algumas cidades dos Estados Unidos da América, como Chicago. No entanto, neste trabalho, os sistemas adiabáticos evaporativos e geotérmicos são incluídos nas simulações do novo índice EUED para avaliar o desempenho dos DCs (ASHRAE, 2005).

Este trabalho começa com a análise das Diretrizes Térmicas da ASHRAE para Processamento para 3 cidades alvos (E.Y., 2015), destinadas ao cálculo do EUED e posterior comparação com os valores de PUE. A análise e discussão dos resultados fornecem um nível mais alto de informações a serem usadas na tomada de decisão do local adequado para instalar um DC.

2 | CIDADES SELECIONADAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Este trabalho é baseado em um Datacenter de alta densidade. As cidades escolhidas para analisar a influência da localização da instalação DC no consumo de energia:

- Curitiba (CTBA), Paraná, Brasil;
- São Paulo (SP), São Paulo, Brasil;
- Rio de Janeiro (RJ), Rio de Janeiro, Brasil.

A Tabela 2 inclui as temperaturas do ar em altitude (H), bolbo seco (TDB) e bolbo úmido (TWB) das cidades de Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro.

Cidades	Frequências	T _{DB} [°C]	T _{WB} [°C]	H [m]
Curitiba	0,4%	30,9	23,2	908
	1%	29,8	22,6	
	2%	28,7	22,0	
São Paulo	0,4 %	32,0	23,2	803
	1%	31,0	22,6	
	2%	30,0	22,1	
Rio Janeiro	0,4%	34,0	26,6	3
	1%	32,7	26,2	
	2%	31,8	25,8	

Tabela 2 - Dados das cidades de Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro (Costa et al, 2015).

Nota: porcentagem do total de horas do ano em que as temperaturas indicadas do projeto podem ser excedidas (Coolpack, 2016).

A diferença entre as temperaturas do bulbo seco das cidades de Curitiba e São Paulo é de 3,56% e entre Curitiba e Rio de Janeiro é de 10,03%. Para fins de comparação, é utilizado um DC de alta densidade de 414 m², medindo 28,8x14,4 m, e com uma dissipação de calor do equipamento (347,3 kW de calor sensível, ou seja, 0,84 kW/m²) e uma carga térmica interna de 48 kW (condução, iluminação = 8 kW no total), pessoas e outros (40 kW de perdas em Nobreak e outros). Foram selecionados 8 equipamentos (4 equipamentos ativos e 4 reservados) de 30 toneladas de refrigeração (TR) “Fluido duplo”, com fator de calor sensível a 85%, conforme mostrado na Tabela 3. Considera-se 1 tonelada de refrigeração = 3516,853 W (Rasmussen, 2012).

O equipamento de fluido duplo possui as especificações técnicas descritas na Tabela 3.

Modelo L99	Unidades	Valor
Capacidade total de refrigeração	kW	194,6
Capacidade de refrigeração sensível	kW	89,3
Relação de calor sensível (SHR)		0,85
Taxa de Eficiência Energética (EER)		3,40
Número de compressores	N	2

Tabela 3 - Recursos padrão do equipamento de ar condicionado de fluido duplo usado nos DCs.

A potência aproximada de 30 toneladas de refrigeração (104,6 kW, para cada um dos oito equipamentos, sendo 1 ativo e outro reservado) possui uma taxa de eficiência energética (EER) de 3,4 kW/kW (na condição de expansão direta), ou seja, a potência O ponto de alimentação do ar-condicionado para atender à carga térmica será de 123,5 kW; portanto, o índice de uso constante de energia Ar externo constante (PUE COA) é a fração da energia total (equipamento de dados + ar-condicionado + iluminação + perdas de nobreak e inversores e outros) à energia do equipamento de dados.

$$PUE\ COA = \frac{Energia\ Total}{Energia\ equipamentos\ datacenter} = \frac{347.30+123.05+8.00+40.00}{347.3} = 1,50\ kW/kW \quad (1)$$

Um PUE COA = 1,50 kW / kW é um valor excelente, pois um DC típico já citado acima tem um valor PUE COA = 2,1 kW/kW. Estes rendimentos do equipamento de ar condicionado foram baseados em uma temperatura de entrada de ar no condensador de 33°C a 35°C. Esses valores de temperatura estão próximos dos valores encontrados em duas cidades já mencionadas, ou seja, o PUE das duas cidades seria o mesmo.

3 | COMPARAÇÃO DE PUE COA E EUED

O índice PUE COA é semelhante ao índice PUE, mas com ênfase na temperatura externa no valor médio de 0,4% das temperaturas mais altas atuais do ASHRAE *WEATHER DATA VIEWER* que é igual à NBR 16401 (*HVAC Design Brazilian Standard*) (ABNT, 2008)

Diferentemente do PUE, que está relacionado apenas aos índices de energia, o índice EUED está relacionado às 8760 horas (as métricas usam energia em vez de energia, o que já é uma sugestão da ISO 50006 para edifícios comerciais, a métrica com unidades de energia específica, kWh/m²).

Usando o índice anual de temperatura do bulbo seco associado à temperatura coincidente do ponto de orvalho (dados do ASHRAE *Weather Data Viewer*), o índice EUED é classificado como (ABNT, 2008):

- *Free Cooling* - Sistema que permite o uso das características entálpicas do ar externo para aclimatar um recinto;
- Evaporação - resfriamento adiabático, que consiste em resfriar o ambiente usando a temperatura do bulbo úmido;
- COP - Coeficiente de desempenho, usado para avaliar a relação entre a capacidade de refrigeração e o trabalho gasto.

Com base em uma temperatura média de descarga de 20°C, o cálculo segundo a metodologia EUED considerou os seguintes fatores:

- Quando a temperatura estiver abaixo de 20°C e a entalpia estiver abaixo de 18,4 BTU/lb, apenas o Free Cooling será usado;
- Quando a temperatura estiver entre 15°C e 24°C e a entalpia estiver entre 18,4 e 24 BTU/lb, será utilizado o sistema evaporativo;
- Quando a temperatura estiver acima de 20 ° C e a entalpia estiver acima de 24

BTU/lb, o sistema normal será usado nas seguintes condições:

- ✓ Temperatura da entrada de ar entre 24°C e 27°C: COP1;
- ✓ Temperatura da entrada de ar entre 27°C e 30°C: COP2;
- ✓ Temperatura da entrada de ar entre 30°C e 33°C: COP3;
- ✓ Temperatura da entrada de ar acima de 33°C: COP4.

Para simular as condições de COP1, COP2, COP3 e COP4, o software Cool pack foi usado para simular um coeficiente isentrópico padrão para identificar o COP com a variação nas temperaturas de condensação. O efeito da temperatura da condensação é baseado na temperatura média da entrada de ar para cada situação adicionada a 11°C, Com as seguintes condições, Tabela 4:

Casos	Potência do Equipamento [kW]	Temperatura de Condensação [°C]	Temperatura de Evaporação [°C]	Fluido de Refrigeração	COP [kW/kW]
COP1	104,5	36,5	5,0	R410A	4,381
COP2	104,5	39,0	5,0	R410A	4,101
COP3	104,5	42,5	5,0	R410A	3,745
COP4	104,5	44,0	5,0	R410A	3,633

Tabela 4 - Distribuição do consumo de eletricidade em um DC típico.

Em todos os estudos para este caso, o cálculo para o COP4 considera os ventiladores com potência de 7,36 kW. No caso do estudo COP4, o valor do COP sem os ventiladores atinge 4,829. Para obter o COP com os ventiladores, será utilizada a seguinte equação: $(104,5 / 21,64 \text{ kW de compressores} + 7,36 \text{ kW de ventiladores}) = 3,633 \text{ kW/kW}$.

O COP3 considerou os ventiladores alimentados a 7,36 kW, ou seja: um COP de 5,087, com os ventiladores, o valor do COP é $(104,5 / (20,54 \text{ kW dos compressores} + 7,36 \text{ dos ventiladores})) = 3,745 \text{ kW/kW}$.

O COP2 possui ventiladores alimentados a 7,36kW. O COP será $(104,5 \text{ kW} / (18,12 \text{ de compressores} + 7,36 \text{ de ventiladores})) = 4,101 \text{ kW/kW}$; e sem ventiladores, ele aumentará para 5,768 kW/kW.

O COP1 considera ventiladores com potência de 7,36 kW. O COP será $(104,5 \text{ kW} / (16,49 + 7,36)) = 4,381 \text{ kW} / \text{kW}$; enquanto o COP sem ventiladores será de 6,338 kW/kW.

A partir dos valores de COP, foi elaborado um sistema de ampla cobertura para todos os possíveis pontos externos de temperatura, seja para “Free Cooling”, “Evaporative Cooling” ou apenas “Cooling”. Usando ASHRAE (2013), definiu-se como método a associação das frequências de temperatura do bulbo seco e as temperaturas coincidentes do ponto de orvalho; e em cada ponto, a entalpia associada a essa relação foi encontrada nas seguintes frequências cumulativas para cada sistema e cidade (Tabela 5):

O índice EUED classifica as frequências no horário de trabalho para as três cidades. Vale ressaltar que entre as cidades existem diferenças. Em Curitiba, o sistema evaporativo

tem a maior frequência (3453,887 horas) quando a temperatura está entre 15°C e 24 ° C e a entalpia está entre 18,4 e 24 BTU/lb. Em São Paulo, a frequência é de 4713,20 horas e no Rio de Janeiro, a frequência é de 2131,860 horas.

O sistema Free Cooling, com temperatura abaixo de 20 °C e entalpia menor que 18,4 BTU/lb, Curitiba tem 4410 horas de frequência, São Paulo tem 2574,191 horas e o Rio de Janeiro tem 159,515 horas (Rasmussen, 2012).

De acordo com a Tabela 5, verifica-se que, com as regras propostas no EUED, seis níveis foram classificados: *Free Cooling*; Evaporativo; COP1; COP2; COP3; COP4. As cidades de Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro, possuem diferentes consumos de energia de acordo com a temperatura e a entalpia. Em um período de 8760 horas, São Paulo usou 18,06% mais energia que Curitiba, e o Rio de Janeiro usou 57,35% mais energia que Curitiba. A tabela 5 também mostra a relação entre COP e energia. Quanto maior o COP, menor é o consumo de energia. Nas tabelas 6 e 7, cálculos usando regras do índice EUED e resultam nos cálculos usando as regras do índice EUED.

O consumo de energia com infraestrutura, que é a soma do consumo de energia mais ar-condicionado, equipamentos, iluminação e outros equipamentos, entre as cidades mostra diferença superior a 1,21% para São Paulo em relação a Curitiba; e 10,61% para o Rio de Janeiro em relação a Curitiba. Os índices obtidos com a aplicação do índice EUED foram, respectivamente, 1.245 kW/kW para Curitiba, 1,260 kW/kW para São Paulo e 1,377 kW/kW para o Rio de Janeiro, mostrando uma diferença de 16,86% para Curitiba, 16,19% São Paulo e 10,31% para o Rio de Janeiro em relação ao PUE, como mostra a Tabela 8.

Status do sistema	t_{CTBA} [h]	t_{SP} [h]	t_{RJ} [h]
"Free Cooling"	4410,000	2574,191	159,515
Refrigeração Evaporativo	3453,887	4713,820	2131,860
COP1	579,743	906,945	4536,432
COP2	269,874	434,482	1108,059
COP3	45,987	122,639	554,971
COP4	0,509	7,922	269,163

Tabela 5 - Frequência em horas de uso.

Sistema de operação	Carga Térmica Total [kW]	COP [kW/kW]	Potência [kW]	t_{CTBA} [h]	t_{SP} [h]	t_{RJ} [h]
“Free Cooling”	395,3	19,18	20,610	4410,000	2574,191	159,515
Evaporativo	395,3	16,78	23,558	3453,887	4713,820	2131,860
COP1	395,3	4,381	90,231	579,743	906,945	4536432
COP2	395,3	4,101	96,391	269,874	434,482	1108,059
COP3	395,3	3,745	105,554	45,987	122,639	554,971
COP4	395,3	3,633	108,808	0,509	7,922	269,163
Sistema de operação	E_{SP} [kWh/ano]	E_{CTBA} [kWh/ano]	E_{RJ} [kWh/ano]	$E_{Equip.}$ [kWh/ano]	$E_{Iluminação}$ [kWh/ano]	E_{Outros} [kWh/ano]
“Free Cooling”	53054,104	90890,143	3287,599	3042348	70080	420480
Evaporativo	111047,266	81366,013	50221,945			
COP1	81834,164	52310,503	409324,685			
COP2	41880,210	26013,493	106807,078			
COP3	12945,054	4854,091	58579,443			
COP4	862,021	55,362	29287,177			
Gastos totais do ar	301622,819	255489,606	657507,928			

Tabela 6 - Cálculos usando regras do índice EUED.

Parâmetros	Valor
E_{CTBA} [kWh ano]	3788397,606
E_{SP} [kWh ano]	3834530,819
E_{RJ} [kWh ano]	4190415,928
$EUED_{CTBA}$	1,245
$EUED_{SP}$	1,260
$EUED_{RJ}$	1,377
$(EUED/PUE COA)_{CTBA}$ ano	16,86%
$(EUED/PUE COA)_{SP}$ ano	16,19%
$(EUED/PUE COA)_{RJ}$ ano	10,31%

Tabela 7 - Resultados nos cálculos usando as regras do índice EUED.

Na Figura 2, as informações comparativas do COP PUE COA e do COP EUED mostram que o COP EUED é muito maior que os outros índices, portanto, esta é a melhor maneira de mapear as possibilidades na fase de concepção do projeto e obter resultados satisfatórios no instalações de novos DCs.

CIDADES	PUE COA	EUED	COP PUE COA	COPEUED
Curitiba	1,455	1,245	3,745	13,553
São Paulo	1,467	1,260	3,642	11,481
Rio de Janeiro	1,481	1,377	3,463	5,629

Tabela 8 – Comparação de PUE COA, EUED, COP PUE COA e COP EUED.

O TEWI é uma métrica do impacto do aquecimento global do equipamento com base nas emissões totais de gases de efeito estufa durante a operação do equipamento e no descarte de fluidos operacionais em fim de vida. O TEWI considera tanto as emissões furtivas diretas quanto as indiretas produzidas através da energia consumida nas operações do equipamento. O TEWI é medido em unidades de massa em kg de equivalente dióxido de carbono (CO₂) (ASHRAE, 2005)

Essa metodologia foi aplicada no desenvolvimento do projeto do DC, determinando um COP PUE COA para comparar a eficiência com o EUED nas três localidades calculadas, Curitiba, Rio de Janeiro e São Paulo. Os dados foram selecionados na ABNT NBR 16401-01-2008. Nesta etapa, a cidade de Chicago (USA) foi adicionada. A comparação dos dados das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido é mostrada na Tabela 9 (ABNT, 2008).

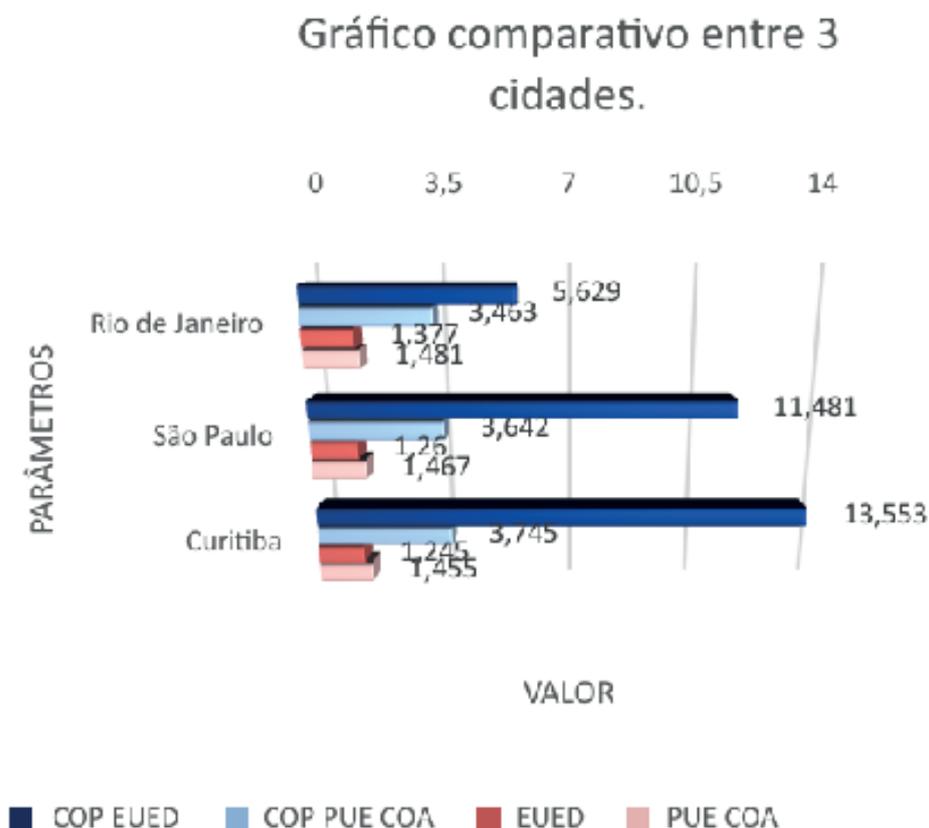


Figure 2 – Comparação dos COP PUE COA e COP EUED.

CIDADES	EUED	COP PUE COA/VENTILADOR	Energia Consumida	TEWI
Curitiba	1.277	3.745	255489.60	667042.128
São Paulo	1.163	3.642	301622.819	709946.022
Rio de Janeiro	1.389	3.122	657507.928	1040919.173
Chicago	1.246	3.477	258533.316	1781566.043

Tabela 9 – Comparação de valores de TEWI.

De acordo com a Tabela 9, nota-se que, embora Curitiba e Chicago tenham consumo anual de energia HVAC semelhante, o TEWI das cidades é completamente diferente: O TEWI de Chicago (USA) é 1781566,043 CO₂ kW/10 anos e Curitiba (Brasil) é de 667042,128 CO₂ kW/10 anos. Assim, Chicago tem uma despesa anual 267,08% maior que Curitiba, como mostra a Figura 3.

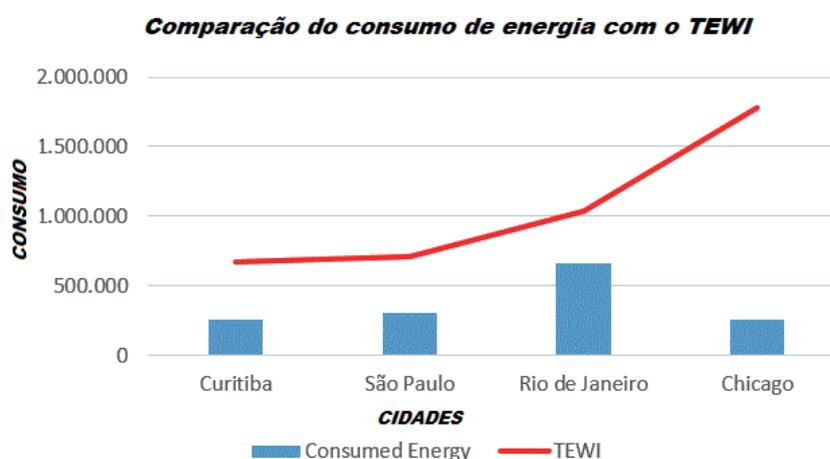


Figura 3 - Comparação do consumo de energia com o TEWI.

4 | CONCLUSÕES

O novo índice EUED proposto é um índice mais confiável que o PUE para analisar a eficiência energética em novos DCs, pelo fato de enfatizar as características ambientais externa dos DCs, O “Free Cooling” usando a entalpia é extremamente importante para a escolha do local para instalação de um Datacenter.

Entre as cidades escolhidas, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro, a diferença de consumo de energia é superior a 1,21% de São Paulo em relação a Curitiba e 10,61% do Rio de Janeiro em relação a Curitiba. Os valores da EUED são, respectivamente, 1,245 kW/kW para Curitiba, 1,260 kW/kW para São Paulo e 1,377 kW/kW para o Rio de Janeiro, dando uma diferença de 16,86% para Curitiba, 16,19% para São Paulo e 10,31% para o Rio de Janeiro em relação ao PUE COA. Usando o TEWI como métrica, para um consumo anual de GWP (efeito estufa) HVAC semelhante entre Curitiba e Chicago, os valores TEWI determinados são extremamente diferentes, onde o TEWI de Chicago (USA) é 1781566,043

CO₂ kW/10 anos e Curitiba (Brasil) é 667042,128 CO₂ kW/10 anos.

O valor da cidade nos USA corresponde a uma despesa anual 267% maior que em Curitiba. A vantagem do EUED é que ele trabalha com as 8.760 horas na fase de projeto, usando elementos psicométricos para determinar quando usar o sistema de resfriamento e evaporação livres e, mais importante, variando o COP de acordo com as características ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 16401-2008. **Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários, qualidade do ar interior**. Rio de Janeiro. 2008.
- AHRTI. **Methods of Calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI)**. AIRHA. 2012.
- ASHRAE. **Thermal guidelines for data processing environments-expanded data center classes and usage guidance**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Inc.; 2011.
- ASHRAE. **PUE – A comprehensive Examination of the Metric**. 2013.
- ASHRAE. **Fundamentals Handbook. Climatic design information**. Chap. 28. 2005.
- Beitelmal, A. H.; Fabris, D. **Servers and data centers energy performance metrics**. 2014.
- Cisco. **Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology**. 2015–2020. White Paper C11-738085-00, Cisco. 2016.
- COOLPACK. **Software de simulação Coolpack**. 2016.
- EY. **Lessons from change: building a better working world**. Ernst & Young. 2015.
- Costa, Guilherme Simões da. **Avaliação do uso de economizadores para redução de consumo de energia em edificações climatizadas**. 2014.
- Covas, Miguel Trigueiros; Silva, Carlos A.; Dias, Luis C. **On locating sustainable Data Centers in Portugal: Problem structuring and GIS-based analysis**. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 3(1), 27-35. 2013.
- Covas M.T., Silva C.A., Dias L.C. **Multi-Criteria Assessment of Data Centers Environmental Sustainability**. In: Bisdorff R., Dias L., Meyer P., Mousseau V., Pirlot M. (eds) *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria*. *International Handbooks on Information Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2015.
- Google. **Environmental Report 2019**. USA. September 2019.
- Green Grid. **PUE™: A comprehensive examination of the metric**. White paper #49 (Eds: V. Avelar, D. Azevedo, A. French), The Green Grid. 2012.
- Green Grid. **CUE – Carbon Usage Effectiveness. A Green Grid data center sustainability metric**. White paper #32. 2012.
- Green Grid. **WUE – Water Usage Effectiveness. A Green Grid data center sustainability metric**. White paper #35. 2012.

Lajevardi, Babak; Haapala, Karl R.; Junker, Joseph F. **Real-time monitoring and evaluation of energy efficiency and thermal management of data centers**. 2014.

Khalaj, Ali Habibi; Abdulla, Khalid; Halgamuge, Saman K. Marks' **Towards the stand-alone operation of data centers with free cooling and optimally sized hybrid renewable power generation and energy**. Standard handbook for Mechanical Engineers, 8th Ed., McGraw Hill, p. 19–3. 2018.

Rasmussen, N. **Implementing Energy Efficient Data Centers**. White Paper 114. Schneider Electric Data Center Science Center. Schneider-Electric. 2012.

Rs-online. **Designspark the evolution of data-center models**. Disponível em <https://www.rs-online.com/designspark/the-evolution-of-data-center-models>. Acessado em 03/03/2020.

Saylor et al. **Fluid selection and property effects in single- and two-phase immersion cooling (of electronic components)**. IEEE Trans on Comp, Hyb, and Manuf Technol. Vol 11. Is 4. Dec. 1988.

MÓDULO DE SENSORIAMENTO INERCIAL APLICADO À CAPTURA DE MOVIMENTO DA MARCHA NA PARALISIA CEREBRAL

Data de aceite: 19/06/2020

Lucas Novaki Ribeiro

Laboratório de Biomecatrônica, Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
São Paulo

Rafael Traldi Moura

Laboratório de Biomecatrônica, Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
São Paulo

RESUMO: A reabilitação da população deficiente é essencial para garantir um aumento na qualidade de vida, e este processo ganha ainda mais relevância no Brasil, considerando que quase um quarto da população possui algum tipo de deficiência. Neste contexto, a fim de prover acompanhamento médico no ganho de funções motoras, sistemas comerciais de captura de marcha são empregados. Contudo, estes sistemas tem baixa portabilidade, são de elevado custo e não fornecem parâmetros de marcha específicos para pessoas com paralisia cerebral – deficiência grave com maior incidência na infância. Assim, este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de sensoriamento inercial portátil e de baixo

custo, aplicado à captura tridimensional da marcha de crianças com paralisia cerebral. Foi obtido um erro de 16,6% em comparação com um sistema óptico padrão ouro na determinação do tamanho do passo.

PALAVRAS-CHAVE: Paralisia cerebral; IMU; captura de movimento; sensor inercial

ABSTRACT: The rehabilitation of the disabled population is essential to guarantee an increase in quality of life, but this task is even more relevant in Brazil, considering that almost a quarter of the population has some type of disability. In this context, in order to provide medical monitoring for the gain of motor functions, commercial motion capture systems are employed. However, these high-cost systems have low portability and do not provide specific gait analysis for people with cerebral palsy - a severe deficiency with high incidence in childhood. Thus, the purpose of this research was to develop a portable, low-cost inertial wearable device, which is oriented to the 3D gait capture of children with cerebral palsy. The comparison to a gold standard optical system resulted in an error of 16,6% for the measurement of the step size.

KEYWORDS: Cerebral palsy; IMU; motion capture; inertial sensor

1 | INTRODUÇÃO

A reabilitação de pacientes com alguma deficiência tem papel fundamental na melhora de funções corporais, bem como na inclusão e participação desta população no mercado de trabalho e vida cívica [1]. Para crianças com paralisia cerebral (PC), a reabilitação de marcha tem grande potencial em maximizar a autonomia, permitindo uma maior participação na vida social e educação. Além disso, quando iniciada na fase infantil, a reabilitação de todas as formas de deficiência tem maior capacidade de obter melhores resultados[1]. Sendo portadores de distúrbios neuromotores, pessoas com PC têm o modo de andar afetado, de forma que o estudo e análise da marcha destes pacientes auxiliam na mensuração da evolução de tratamentos. Frequentemente, as escalas e métodos empregados no ambiente clínico para avaliar a marcha são subjetivos. Especialistas analisam visualmente a qualidade da marcha fazendo o paciente andar por um trecho determinado, e em seguida o próprio paciente faz uma auto avaliação. A utilização de parâmetros objetivos, que forneçam aos profissionais da saúde informações relevantes com elevado grau de acurácia, fornece um complemento ao tratamento feito com técnicas subjetivas [2]. Assim, o uso de tecnologias acessíveis que prestam assistência em tratamento e acompanhamento clínico é aliado importante na fase de reabilitação. Já existem atualmente opções de sistemas comerciais de análise de marcha e reabilitação. O VICON® possibilita a captura de movimentos tridimensionais através de um sistema de câmeras e marcadores fixos em pontos anatômicos específicos do sujeito. O LOKOMAT® é uma esteira equipada com exoesqueleto de membro inferior que permite o controle do padrão de marcha. O CAREN® é um ambiente de reabilitação com uma interface de realidade virtual e uma plataforma 5 móvel com 6GL. Um conjunto de sensores ópticos e de pressão obtêm os parâmetros de marcha que auxiliam na recuperação de pacientes. Contudo, a baixa portabilidade e o elevado custo destes sistemas restringem seu uso a grandes centros de reabilitação ou centros de pesquisa de ponta que dispõem de infraestrutura complexa e pessoal especializado. Considerando que a população deficiente possui menor participação na economia e maior índice de pobreza quando comparada com a população sem deficiência [1], o acesso a essas tecnologias se mostra difícil, tornando ainda mais urgente o desenvolvimento de soluções acessíveis de baixo custo direcionadas à reabilitação motora de pacientes com PC. Neste contexto, torna-se importante o desenvolvimento de soluções para sistemas de captura de movimento sem marcadores, independentes de infraestrutura fixa e cara. Assim, a pesquisa aqui propõe uma solução alternativa para o estudo dos movimentos de pacientes com PC, através da utilização de unidades de medição inercial IMU (Inertial Measurement Unity). O projeto desenvolvido consiste no design e construção de um sistema de sensoriamento inercial de baixo custo, portátil e não restritivo ao movimento humano. Os dispositivos poderão no futuro ser aplicados na captura de movimento 3D das juntas e membros inferiores durante a marcha de crianças com paralisia cerebral.

2 | METODOLOGIA

2.1 Estrutura do sistema de sensoriamento

A entrada do sistema concebido foi o movimento do andar do sujeito. Ele vestiu dois módulos inerciais em cada perna: um na coxa e um na perna. Além dos sensores inerciais, o sujeito utilizou um sensor de força em cada pé, localizado no calcanhar e fixado na palmilha. O uso deste tipo de sensor permitiu identificar eventos na marcha e guiar o tratamento de dados das IMUs. Ao final do processamento de sinal obtidos pelos sensores, foi gerado um arquivo CSV contendo uma matriz da posição 3D (x, y, z) das articulações estudadas. A partir deste arquivo final, parâmetros de marcha espaço-temporais podem ser obtidos em futuras aplicações do dispositivo como tecnologia de reabilitação.

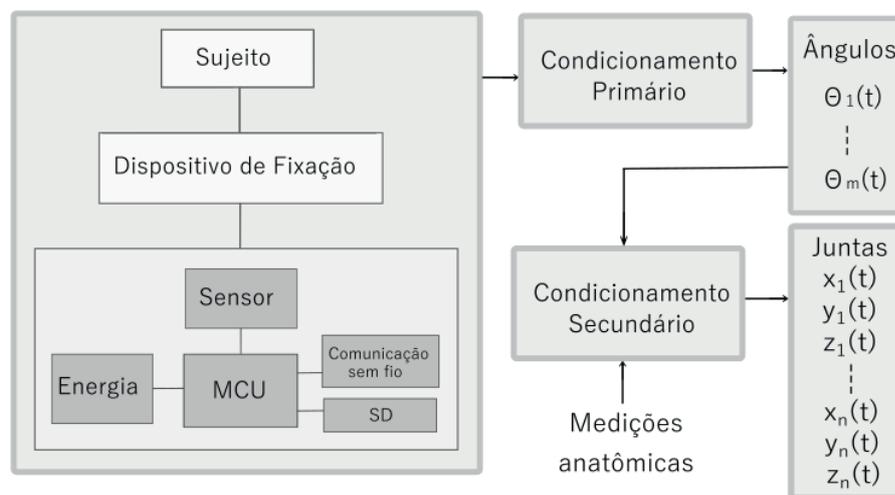


Figura 1: Estrutura proposta do sistema de sensoriamento inercial

2.2 Modelagem e Equacionamento

De forma a obter as posições 3D das articulações dos membros inferiores (junta do quadril, joelho e tornozelo) foi considerado que: (a) os membros inferiores são corpos rígidos e podem ser modelados como segmentos que conectam articulações, modeladas como pontos; (b) a variação angular do quadril durante a marcha é pequena e pode ser desprezada; (c) sempre há pelo menos uma parte de um dos pés em contato com o chão. Em especial (a) e (b) são simplificações usadas no modelo biomecânico de duplo pêndulo invertido[3].

Inicialmente, para o estudo da marcha saudável, é razoável supor que o sujeito anda sempre em linha reta, as variações de movimento na direção perpendicular ao movimento são mínimas, e que não há rotação dos membros na direção dos ossos. Desta forma, as IMUs na perna e coxa podem identificar o ângulo que estes segmentos fazem com a direção vertical. Seja M_i o módulo inercial i ($i = 1, 2, 3, 4$), e θ_i o ângulo formado pelo eixo z de M_i e a direção horizontal, conforme mostra a Figura 2. O output de orientação absoluta em quaternions da IMU BNO055 e, em seguida, um tratamento matemático adequado permitiram calcular o ângulo θ_i .

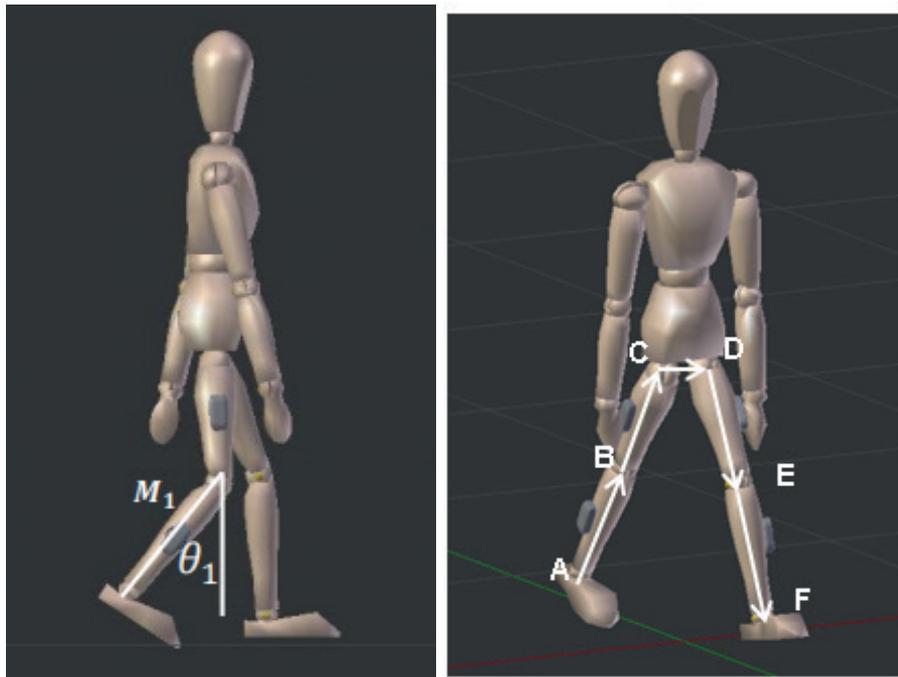


Figura 2: Ângulo entre módulo inercial e solo. Figura 3: Cálculo das posições das articulações usando cadeia aberta de elos

Considerando agora:

A: tornozelo esquerdo;

B: joelho esquerdo;

C: junta esquerda do quadril;

D: junta direita do quadril;

E: joelho direito;

F: tornozelo direito;

l_1 : tamanho da perna direita;

l_2 : distância entre joelho direito e junta do quadril;

l_3 : distância entre juntas do quadril;

l_4 : distância entre joelho esquerdo e junta do quadril;

l_5 : tamanho da perna esquerda

Supondo conhecido o ponto A em um sistema de coordenadas global e considerando que o pé esquerdo está em contato com o chão, temos como obter os outros pontos utilizando as seguintes equações vetoriais:

$$B = A + l_1[\cos\theta_1 \ 0 \ \sin\theta_1]^T$$

$$C = B + l_2[\cos\theta_2 \ 0 \ \sin\theta_2]^T$$

$$D = C + l_3[\ 0 \ 1 \ 0]^T$$

$$E = D - l_4[\cos\theta_3 \ 0 \ \sin\theta_3]^T$$

$$F = E - l_5[\cos\theta_4 \ 0 \ \sin\theta_4]^T$$

Esta soma vetorial em cadeia aberta pode ser vista em mais detalhes na Figura 3. Adotando o modelo de duplo pêndulo invertido, ignora-se a variação angular do quadril, então se considera que o vetor DC sempre será paralelo ao eixo y. Usando as equações acima, é possível calcular as posições das articulações a partir de um ponto conhecido e os ângulos das IMUs. O início da fase de duplo apoio será identificado pelos sensores de força, localizados na palmilha do sujeito. A posição do ponto F, antes em movimento, agora é fixa, já que o pé correspondente está apoiado no solo. Portanto, pode-se repetir o procedimento de cálculo de posições de um sistema de elos em cadeia aberta. Desta vez, calculam-se todos os outros pontos a partir de F.

2.3 Projeto do Dispositivo

No projeto eletrônico do dispositivo, foi desenvolvido no software DipTrace o esquemático da placa eletrônica do sistema embarcado. Ao todo, foram fabricadas quatro placas, uma para cada módulo inercial. No projeto de software do microcontrolador empregado (ESP-32) foi implementada uma máquina de estados que garante a correta aquisição de dados e comunicação com o programa em MATLAB. O condicionamento do sinal para obtenção dos ângulos dos segmentos e posições das articulações foi inteiramente conduzido no MATLAB. Em relação à estrutura física para abrigar o sistema embarcado, foi selecionada uma caixa plástica com dimensões adequadas e foram realizadas operações de usinagem.



Figura 4: Protótipo final do módulo de sensoriamento inercial

2.4 Validação

A validação do sistema proposto foi feita com o sistema padrão ouro OptiTrack em sujeitos saudáveis, com o auxílio de 10 marcadores ópticos. Os sujeitos andaram em uma esteira enquanto os dados dos dois sistemas foram coletados. De forma geral, o protocolo de teste consistiu em (1) medições anatômicas dos segmentos dos membros inferiores e quadril (distância entre ossos fêmur); (2) calibração dos módulos inerciais e sensor de força dos pés; (3) coleta de dados com esteira a 3 km/h.

3 | RESULTADOS

Serão apresentados os gráficos de ângulos dos segmentos e posições das articulações para um dos sujeitos, a fim de comparar o sistema de Módulos Inerciais (MI) com o sistema padrão ouro OptiTrack (OP).

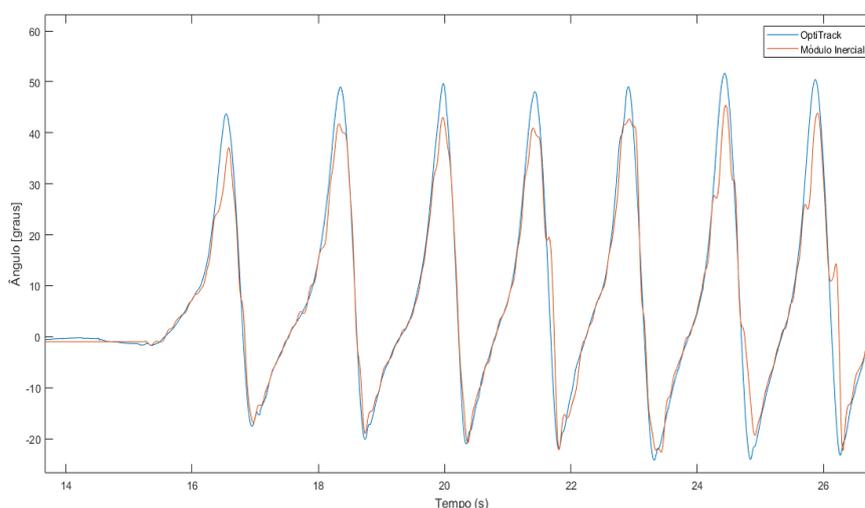


Figura 5: Ângulo da perna esquerda com a direção vertical

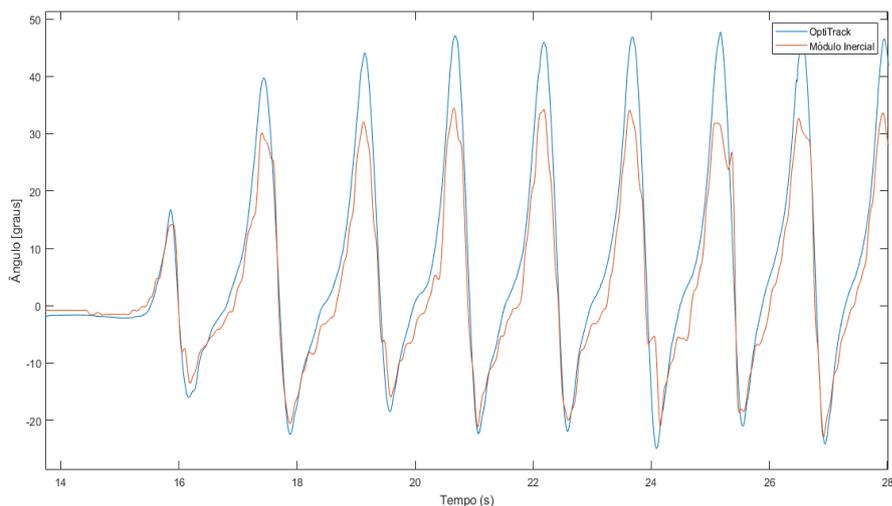


Figura 6: Ângulo da perna direita com a direção vertical

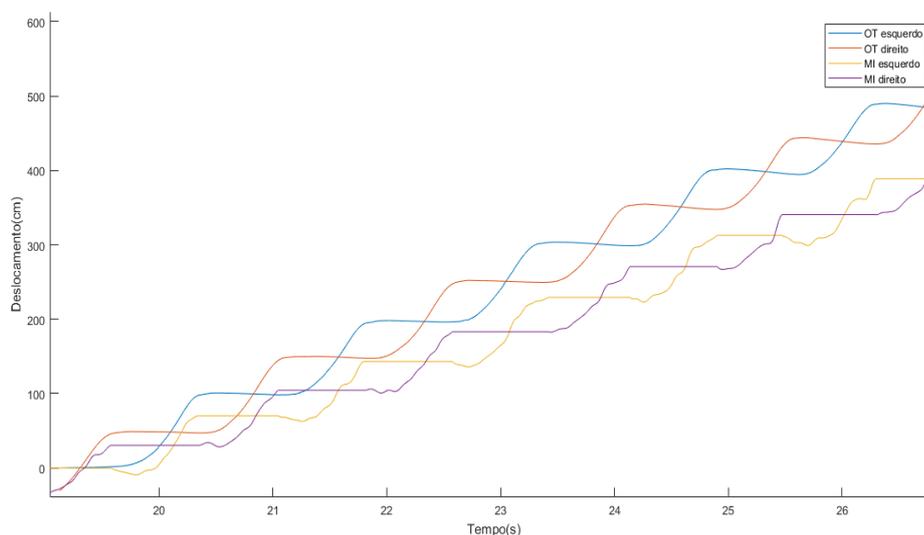


Figura 7: Posição dos calcanhares na direção do movimento

4 | DISCUSSÃO

Na primeira etapa de condicionamento do sinal, foram calculados os ângulos de pitch de cada um dos quatro segmentos analisados. O sistema desenvolvido, chamado aqui de Módulo Inercial, apresentou resultados muito próximos do sistema padrão ouro para a coxa esquerda, conforme mostra a Figuras 5. Os desvios principais podem ser vistos nos picos e vales da curva obtida para seis ciclos de marcha. A raiz do erro médio quadrático (RMSE) foi de 4,8 para a perna esquerda.

Analisando o mesmo sujeito no entanto, para a perna direita o valor de RMSE foi 6,7. De fato, é possível ver na Figura 6 como o sistema MI apresentou uma curva que segue a tendência de movimento mas não com valores próximos ao padrão ouro. Uma possível justificativa é que a fixação dos dispositivos no lado direito não seguiram as exigências de

alinhamento com os ossos do sujeito.

Os erros na determinação dos ângulos de pitch provocam um erro acumulativo na determinação da posição dos pontos das articulações. Conforme mostra a Figura 7, há um desvio crescente já que ocorreu uma subestimação no deslocamento do calcanhar e joelho por MI para cada passo. Como o modelo de marcha utilizado não considera a rotação do quadril, há um erro sistemático crescente para a posição. A comparação entre a evolução da posição do calcanhar e da junta do quadril no sistema OptiTrack permite concluir que a rotação do quadril contribui com cerca de 17% do deslocamento do calcanhar em um passo da caminhada.

Usando as curvas do calcanhar, pode-se avaliar o erro do sistema MI. Foram selecionados pontos que correspondem aos instantes em que o pé toca o chão e a posição se torna temporariamente constante. A partir destes pontos foi feita uma regressão linear (Figura 8) para comparar a inclinação das retas. Por meio do coeficiente linear das retas, calculou-se o erro do sistema MI para estimação do tamanho de um passo, o qual corresponde a 16,6%.

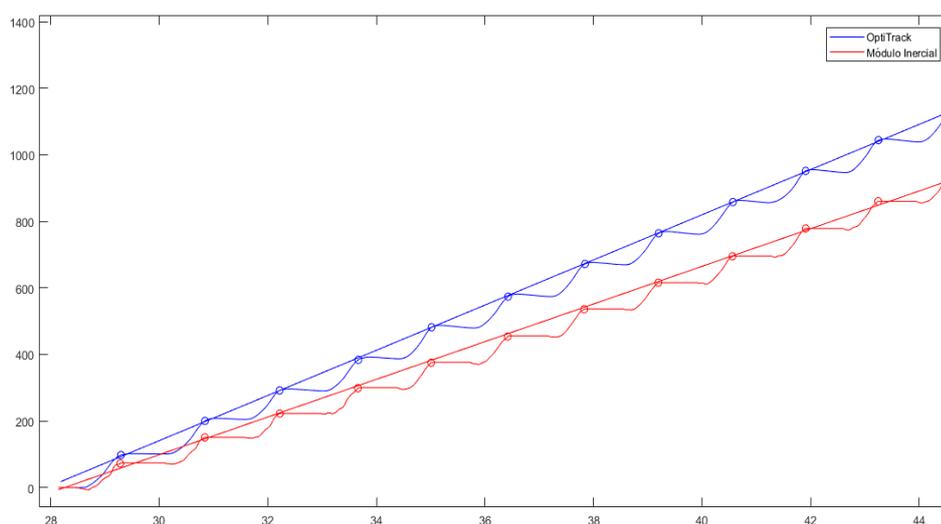


Figura 8: Avaliação do erro do sistema MI com regressão linear

5 | CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de sensoriamento inercial de baixo custo, portátil e não restritivo ao movimento humano. Seguindo este objetivo, foi feito um projeto mecânico, eletrônico e de software que permitisse englobar todos estes aspectos, buscando a melhor precisão.

O resultado final foram quatro módulos inercias, os quais tem um dispositivo de fixação para a perna e coxa e mantém uma comunicação sem fio com um computador. Foram realizados testes em uma esteira e foi empregado o sistema de câmeras OptiTrack padrão-ouro para validar o sistema.

Ao final, respeitando um requisito de projeto, foi possível gerar um arquivo CSV com

as posições das juntas dos membros inferiores. O cálculo da distância percorrida pelo calcanhar em um passo obteve um erro de 16,6%. O modelo de marcha empregado não considera a rotação do quadril, a qual contribui com cerca de 17% do movimento na direção da caminhada. É possível concluir que a busca por uma melhor acurácia do sistema deve adotar um modelo de marcha com menos simplificações e que não despreze esta rotação do quadril. Ainda assim, os resultados foram positivos e corroboram a ideia de que a tecnologia de sensores inercias, do modo proposto neste trabalho, é uma potencial ferramenta para reabilitação motora.

REFERÊNCIAS

WHO (World Health Organization), "World report on disability 2011," *Am. J. Phys. Med. Rehabil. Assoc. Acad. Physiatr.*, vol. 91, p. 549, 2011.

A. Muro-de-la-Herran, B. García-Zapirain, and A. Méndez-Zorrilla, "Gait analysis methods: An overview of wearable and non-wearable systems, highlighting clinical applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, pp. 3362–3394, 2014.

K. Aminian, B. Najafi, C. Büla, P. F. Leyvraz, and P. Robert, "Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory system using miniature gyroscopes," *J. Biomech.*, vol. 35, no. 5, pp. 689–699, 2002.

CALCULANDO SENSORES LAMBDA, TPS E MAP COM EXATIDÃO MÁXIMA

Data de aceite: 19/06/2020
Data de Submissão: 06/03/2020

Robson Eduardo dos Anjos Schneider

Universidade Federal de Santa Maria/UFSM,
Campus Cachoeira do Sul/CS
Cachoeira do Sul -RS
<http://lattes.cnpq.br/7481159631826210>

Aline Brum Loreto

Universidade Federal de Santa Maria/UFSM,
Campus Cachoeira do Sul/CS
Cachoeira do Sul- RS
<http://lattes.cnpq.br/5322246152490489>

Eduardo Rorato Guarienti

Universidade Federal de Santa Maria/UFSM,
Campus Cachoeira do Sul/CS
Cachoeira do Sul- RS
<http://lattes.cnpq.br/2333384654997909>

Matheus Brondani de Vargas

Universidade Federal de Santa Maria/UFSM,
Campus Cachoeira do Sul/CS
Cachoeira do Sul- RS
<http://lattes.cnpq.br/4496896343829474>

RESUMO: O presente trabalho consiste em aplicar a matemática intervalar nos cálculos operacionais dos sensores Lambda, TPS e MAP do sistema de injeção eletrônica de combustível de um automóvel, tendo como objetivo obter resultados mais precisos para

seu funcionamento, possibilitando melhorar a performance do veículo, otimizando o consumo de combustível e gerando menos poluentes.

PALAVRAS-CHAVE: injeção eletrônica, matemática intervalar, precisão.

CALCULATING LAMBDA, TPS AND MAP SENSORS WITH MAXIMUM ACCURACY

ABSTRACT: The present work consists of applying interval mathematics in the operational calculations of the Lambda, TPS and MAP sensors of a car's electronic fuel injection system, with the objective of obtaining more accurate results for its operation, making it possible to improve the performance of the vehicle, optimizing the fuel consumption and generating less pollutants.

KEYWORDS: electronic injection, interval mathematics, precision.

1 | INTRODUÇÃO

A injeção eletrônica consiste em um aparelho eletrônico capaz de dosar ao motor a quantidade necessária de ar-combustível para que o mesmo funcione perfeitamente. Para o funcionamento correto de um motor com este sistema, é necessária a utilização

de vários componentes, o principal é a Unidade Central Eletrônica (ECU), onde se tem dados do veículo e seus parâmetros de ajuste de fábrica, além de realizar os cálculos de tempo de injeção (DENTON, 2004). Porém, ao representar dados numéricos no sistema de ponto flutuante, estes são aproximados para um subconjunto finito dos números reais. Através desta aproximação, erros são gerados pela impossibilidade da máquina de representar todos os valores reais com toda a sua exatidão (RATSCHEK, 1988). Erros numéricos gerados pela ECU podem aumentar o nível de poluentes, superaquecer o motor ou provocar consumo excessivo de combustível, por exemplo. Um modo de contornar estes problemas recorrentes a perda de informações ao representar um valor real no sistema de ponto flutuante, é utilizar-se da aritmética intervalar (MOORE, 1966).

Nesta forma de representação numérica, os valores pontuais são representados por um intervalo X que os contenha. Todo erro originado para tratamento dos valores como o arredondamento e truncamento, para adequar o valor pontual a ser representado pela máquina, são tratados pela aritmética intervalar e pelos arredondamentos direcionados (MOORE, 1966).

Com este trabalho, propõe-se abordar com matemática intervalar os cálculos operacionais de três importantes sensores do sistema de injeção eletrônica: o sensor de oxigênio (também conhecido como sensor Lambda), o sensor de posição da borboleta (sensor TPS) e o sensor de pressão absoluta no coletor de admissão (sensor MAP). O objetivo da utilização da matemática intervalar é obter um melhor rendimento para o funcionamento da injeção eletrônica, pois a solução intervalar fornece resultados mais exatos e confiáveis que a solução real.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção descreve brevemente conceitos e fundamentos essenciais para o entendimento e execução do presente artigo.

2.1 Mistura por Injeção Eletrônica

Os dois métodos de mistura mais utilizados em motores de combustão interna são o carburador e o sistema de injeção de combustível. A grande diferença entre estes dois métodos está no seu princípio de funcionamento, uma vez que o carburador mistura mecanicamente o combustível com o ar, enquanto a injeção pulveriza combustível diretamente para a câmara de combustão ou para o coletor de admissão onde se efetua a mistura de ar com combustível (PROTÁSIO, 2012).

Os injetores funcionam com o auxílio de uma bomba de combustível, a qual mantém o combustível a pressão elevada. O injetor comum, eletronicamente ativado, debita combustível conforme o sinal elétrico que recebe, funcionando como uma “porta” que abre quando passa corrente e fecha quando a corrente para. Portanto um injetor está constantemente sendo “ligado e desligado”, aberto e fechado. Os injetores, conforme a geometria da sua “porta” podem disparar sob a forma de *spray*, aproximadamente atomizada de fácil vaporização, ou

sob a forma de jato que pode ser apontado para uma zona quente, como a cabeça da válvula de admissão ajudando a evaporar a gasolina injetada (TEIXEIRA, 2012).

2.2 Injeção Eletrônica

A injeção eletrônica é um sistema de alimentação de combustível.

“A injeção eletrônica é uma das grandes inovações tecnológicas do automóvel. Surgiu na década de 1980 e foi aperfeiçoada na década de 1990. A injeção veio para substituir o carburador e agregar mais eficiência ao motor, principalmente, quanto às emissões gasosas pelo escapamento. Como ocorria com o carburador, a função deste equipamento é fazer a mistura de ar e combustível, só que nos modernos sistemas isso é feito de maneira extremamente precisa. Quem determina quando, quanto e por quanto tempo as válvulas de injeção abrem é um computador, mas ele faz isso baseado em informações colhidas por sensores e transformadas em sinal elétrico, para chegarem ao computador. A quantidade de combustível deixado entrar irá se juntar ao ar que o motor está admitindo, momento em que se forma a mistura ar/combustível” (FIGUEIREDO, 2004).

O sistema de injeção eletrônica é eficaz pelo fato de seu controle de mistura ar/combustível ser mais preciso. Seu funcionamento é baseado na coleta das condições do motor, feita por sensores e enviadas ao módulo de injeção eletrônica (ECU), através dessas informações, será feito cálculos, correções e posteriormente controlada por atuadores. O combustível é injetado por uma eletroválvula chamada bico injetor, que é presa a uma linha pressurizada por uma bomba de combustível e controlada por um regulador de pressão (AIRD, 1982).

2.3 Sensores

Sensores são dispositivos que trabalham com medidas de grandezas físicas, convertendo-as em sinal elétrico, para que estes possam ser interpretados por sistemas eletrônicos e micro controladores (TEIXEIRA, 2012). Eles estão instalados em pontos estratégicos do motor e tem como finalidade coletar sinais para que a ECU possa analisar e decidir qual estratégia seguir.

Os principais sensores utilizados pela central de um automóvel são (TEIXEIRA, 2012):

- TPS (Throttle Position Sensor) - Este sensor informa a porcentagem do quanto foi pressionado o pedal do acelerador.
- CTS (Coolant Temperature Sensor) - Informa à ECU a temperatura da água do radiador que é muito parecida com a temperatura do motor. Quanto menor for a temperatura, maior a necessidade de combustível para o motor.
- ATS (Air Temperature Sensor) - Informa à ECU a temperatura do ar que entra no motor, assim determinando a quantidade de combustível adequado para uma combustão eficiente.
- MAP (Manifold Absolute Pressure) - Responsável por informar a pressão formada dentro do coletor de admissão, entre a borboleta e o motor.
- Sensor de Rotação - Informa para a ECU a rotação do motor e, na maioria dos sistemas, a posição dos pistões, para a ECU definir a hora certa para a injeção de

combustível e ignição.

- Sonda Lambda ou Sensor de Oxigênio - Este sensor fica alojado no escapamento. Ele informa à ECU sobre a presença de oxigênio nos gases resultantes da combustão. É responsável pela dosagem correta do combustível a ser injetado, pois tem a função de enviar a informação da quantidade de oxigênio que resulta nos gases de escape e é em função desta informação que a ECU libera a quantidade de combustível correta. Em automóveis que funcionam com mais de um combustível (álcool/gasolina) a ECU consegue identificar o combustível utilizado, ou a porcentagem de cada um deles, através do sinal deste sensor.

O presente trabalho considera os sensores Lambda, TPS e MAP a serem calculados com exatidão máxima através da matemática intervalar (MOORE, 1966). Os demais sensores CTS, ATS e de Rotação serão futuramente estudados e aplicados na Teoria Intervalar (MOORE, 1966).

2.4 Matemática Intervalar

A Matemática Intervalar é uma teoria matemática introduzida na década de 1960 que tem como objetivo fundamental o tratamento automático dos erros em Computação Científica (RATSCHEK, 1988). Nesta abordagem, os valores reais, também conhecidos como pontuais, são armazenados através de intervalos, cujos extremos são pontos flutuantes.

A aritmética intervalar utiliza intervalos reais para representar valores infinitos, valores desconhecidos ou para representar valores contínuos que podem ser conhecidos ou não. Os intervalos servem para representar dados inexatos, aproximações e erros de truncamento de procedimentos (RATSCHEK, 1988).

Na matemática intervalar, o valor real x é aproximado por um intervalo \mathbf{x} , que possui como limites inferior e superior números de máquina de forma que o intervalo contenha x . O tamanho deste intervalo pode ser usado como medida para avaliar a qualidade de aproximação (RATSCHEK, 1988). Os cálculos reais são substituídos por cálculos que utilizam a aritmética intervalar (MOORE, 1966).

Os intervalos encapsulam os dados reais considerando o erro máximo que pode ter ocorrido. Os erros (de arredondamento e/ou truncamento) que surgem posteriormente e que se propagam em todo processo computacional são tratados pela aritmética intervalar e pelos arredondamentos direcionados, que, pelo princípio da máxima exatidão, garantem o controle rigoroso dos erros nos resultados de computações numéricas. Assim, ao final do processo matemático-computacional, tem-se uma estimativa da influência dos erros de entrada no resultado final obtido. Esta é uma análise automática, indicada pelo diâmetro do resultado intervalar final.

É importante ressaltar que existem questões do tipo: “Por que utilizar técnicas intervalares se existem na maioria dos sistemas de computadores bibliotecas matemáticas avançadas e eficientes, que resolvem a maioria dos problemas?”.

A justificativa do uso de técnicas intervalares, inicia pelo fato de que os computadores empregam aritméticas chamadas de ponto flutuante ou ponto fixo. Nestas aritméticas, números reais são aproximados para um subconjunto finito de números reais chamados

números de máquina representáveis. Devido esta representação são gerados alguns tipos de erros. O primeiro tipo de erro ocorre quando um valor real de entrada é aproximado para um número de máquina. O segundo tipo de erro é causado pelos resultados intermediários gerados na execução de cada operação e que vão se acumulando. Existe ainda um outro tipo de erro que está relacionado com a incerteza dos dados de entrada, o que acontece muito no caso de experimentos físicos e químicos onde os dados de entrada são incertos (RATSCHEK, 1988).

No processo de resolução de problemas podem ser constatadas algumas fontes de erros: erros de propagação nos dados iniciais, erros de arredondamento e erros de truncamento, causados ao se trancar sequências infinitas de operações aritméticas, após um número finito de etapas. Neste contexto percebe-se a importância de técnicas intervalares. Ressalta-se que uma resposta intervalar carrega com ela a garantia de sua incerteza. Um valor pontual não carrega medidas de sua incerteza. Mesmo quando uma análise de sondagem do erro é executada, o número resultante é somente uma estimativa do erro que pode estar presente.

São muitas as aplicações de intervalos e nas mais diversas áreas, tais como: programação matemática, manipulação de equações, análise e projeto de circuitos elétricos, psicologia matemática, estatística, equações diferenciais, física e muitos outros (KREINOVICH, 1996).

Salienta-se que na literatura pesquisada não encontrou-se a teoria intervalar aplicada a solução de problemas que envolvem sensores e injeção eletrônica de motores.

3 | DESENVOLVIMENTO

Para fazer a abordagem intervalar aos cálculos dos sensores da injeção eletrônica, foram escolhidos primeiramente os sensores Lambda, TPS e MAP pois, estes são os sensores mais importantes para o funcionamento do sistema de injeção eletrônica (DENTON, 2004).

O sensor MAP tem um papel significativo nos sistemas de gerenciamento de motor já que ele informa a ECU com qual carga o motor está trabalhando e calcula a melhor quantidade de combustível para a determinada massa de ar, enquanto o sensor TPS é utilizado para definir a posição do acelerador, e com isso a ECU identifica em qual regime está o motor, marcha lenta (acelerador em posição de descanso), plena carga (acelerador em final de curso) ou aceleração rápida. A sonda Lambda gera um sinal elétrico para que a ECU possa definir a quantidade de combustível a ser injetado, garantindo uma mistura ar/combustível ideal (BOSCH, 2016).

A seguir descreve-se os sensores Lambda, TPS e MAP, as respectivas equações, os cálculos considerando dados reais e, com a representação dos dados de entrada pontuais em intervalos com uma precisão $\delta=0,00001$, os intervalos solução para cada sensor.

3.1 Sensor Lambda

Para que a ECU possa fazer correções no tempo de injeção é necessário verificar em qual estado encontra-se a mistura ar/combustível, para isto é utilizado o sensor que mede os níveis de oxigênio nos gases de escape, que também recebe o nome de sonda lambda.

Para se queimar uma massa de 14,7 kg de ar, é necessário 1 kg de gasolina. Quando a relação da mistura é ideal, recebe o nome de relação estequiométrica. Caso essa mistura esteja fora do especificado, se diz que a mesma está pobre ou rica (FERRARI, 2007). Para identificar se uma mistura é rica, pobre ou ideal é necessário calcular o valor do Fator Lambda, representado pelo símbolo λ , que assume um valor que é definido por (1):

$$\lambda = \frac{\text{relação ar/combustível}}{\text{relação estequiométrica}} \quad (1)$$

O valor $\lambda = 1$ é uma indicação de que a mistura ar/combustível é ideal. Se $\lambda < 1$, a mistura é considerada rica, pois haverá sobra de combustível resultando em um elevado consumo de combustível e maior emissão de poluentes. Em caso de $\lambda > 1$, onde se tem mais ar do que combustível, a mistura é dita pobre e resultará em um superaquecimento do motor.

Através da matemática intervalar, foi calculado o coeficiente λ da sonda lambda com o objetivo de controlar a propagação de erros nos cálculos executados pela sonda. Considerando que a relação combustível/ar ideal é de 1g de gasolina para cada 14,7g de ar, e, se estimarmos que a mistura real queima 15g de gasolina, temos que

$$\lambda = \frac{15g}{14,7g} = 1,020408163,$$

uma mistura considerada “pobre” pela ECU. Porém, para esta estimativa podemos calcular com exatidão máxima através da matemática intervalar considerando uma representação de $\delta = 0,00001$ para os valores reais da mistura real e mistura ideal, obtém-se como resultado o Lambda Intervalar $\lambda_I = [1,020406789; 1,020409538]$.

3.2 Sensor TPS

O sensor de posição de borboleta tem como função informar a unidade de comando sobre a posição angular em que a borboleta de aceleração se encontra. Conforme a angulação da borboleta mais ou menos ar é admitido para dentro do motor, possibilitando saber a que carga o motor está trabalhando, assim podendo definir o avanço ou atraso da ignição (FERRARI, 2007). Basicamente é um potenciômetro linear. Assim com o movimento de abertura da borboleta, altera-se a posição do curso sobre uma trilha. O funcionamento do sensor TPS é regido por (2):

$$V_0 = V_s * \left(\frac{\theta_i}{\theta_t}\right) \quad (2)$$

onde V_0 é a tensão de saída, V_s é a tensão de alimentação, θ_i é o ângulo do potenciômetro e θ_t é o ângulo máximo do potenciômetro. As tensões são medidas em volts e os ângulos em graus ou radianos. A tensão de alimentação V_s é tabelada e vale 5V. O ângulo máximo do potenciômetro é de 24°. No sensor de posição de borboleta, o sinal de referência varia de 0 a 5 volts, sendo 0 fechado e 5 totalmente aberto.

Para o cálculo efetuado, estimou-se uma angulação de 22° para a posição da borboleta. Portanto, de acordo com (2), temos que

$$V_0 = 5 * \left(\frac{22}{24}\right) = 4,58333333 \text{ Volts.}$$

Calculando com exatidão máxima através da matemática intervalar e considerando uma precisão de $\delta = 0,00001$, obtém-se como resultado o TPS Intervalar, $\text{TPSI} = [4,583320173; 4,583346492]$ Volts.

3.3 Sensor MAP

O sensor de pressão absoluta do coletor de admissão, também chamado de sensor MAP, tem por função informar a unidade de comando sobre as variáveis da pressão do coletor de admissão, pressão essa chamada de absoluta uma vez que se considera a pressão atmosférica (1 BAR ao nível do mar - aproximadamente). No sistema de injeção este sensor tem uma papel fundamental, pois é responsável pela indicação da carga do motor. Com isso, a unidade de comando pode determinar o avanço ideal da centelha, substituindo o antigo avanço automático a vácuo do distribuidor.

Atualmente, sensores MAP fazem parte dos sistemas de controle de motores de combustão interna e medem o vácuo no duto de admissão. Quando o motor realiza um ciclo de admissão, um dado cilindro gera uma redução de pressão no duto de admissão para receber a mistura ar-combustível. A pressão nesse duto é informada à ECU que então calcula a vazão mássica de ar (MAF) através da (3):

$$MAF = \frac{(RPM * MAP * volume * MM)}{IAT * R} \quad (3)$$

onde:

MAF = vazão mássica de ar [g/min]

RPM = rotação do motor [min^{-1}]

MAP = pressão absoluta no coletor de admissão [kPa]

volume = volume do cilindro multiplicado pelo número de cilindros [L]

MM = massa molecular do ar (aproximadamente 28,97 g/mol)

R = constante dos gases perfeitos (aproximadamente $8,314416 \text{ J}^*(\text{mol}^*\text{K})^{-1}$)

IAT = temperatura da mistura ar-combustível admitida [K].

Para os cálculos efetuados dos sensores Lambda, TPS, MAP adotados no presente trabalho foram usados os dados obtidos através do sistema OBD (*on-board diagnostic*) de um veículo Chevrolet Suburban ano 1999, movido a gasolina, equipado com um motor de 5733cc de cilindrada e eficiência volumétrica de 34%. A temperatura para a mistura ar-combustível admitida era de $27,372^\circ\text{C}$ ($300,372\text{K}$). Os dados do sistema ODB foram coletados com o veículo funcionando em marcha lenta, com rotação do motor de, aproximadamente, 2131 RPM e fluxo de massa de ar igual a 64,64 g/s ou 3878,4 g/min.

O resultado da pressão absoluta no coletor de admissão utilizando a matemática pontual resultou em $\text{MAP} = 80,95768423 \text{ kPa}$.

Calculando com exatidão máxima através da matemática intervalar considerando uma representação de $\delta = 0,00001$, obtém-se como resultado um MAP intervalar = $[80,94178988; 80,95809855] \text{ kPa}$.

4 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A fim de calcular com maior exatidão os valores obtidos pelos sensores, consideramos os intervalos com uma precisão de $\delta=0,00001$ na representação dos valores reais em intervalos. Na Tabela 1 encontram-se os resultados reais e intervalares obtidos para cada sensor.

Sensores	Valor Real	Valor Intervalar
Lambda	1,020408163	[1,020406789; 1,020409538]
TPS	4,583333333	[4,583320173; 4,583346492]
MAP	80,95768423	[80,94178988; 80,95809855]

Tabela 1. Resultados do Valor Real e Intervalar

Para verificar a qualidade do intervalo solução usualmente utiliza-se duas medidas de erros (RATSCHEK, 1988), sendo elas:

-Erro Absoluto:

$$\text{EA} = |x - m(X)| < w(X)/2,$$

onde $m(X)$ é o ponto médio do intervalo X e $w(X) = |x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}|$ é o diâmetro do intervalo X , $x_{\text{máx}}$ é o extremo superior do intervalo e o $x_{\text{mín}}$, o extremo inferior do intervalo.

-Erro Relativo:

$\text{ER} = |(x - m(X)) / x| \leq (w(X)) / (2\min|X|)$ se $0 \notin X$, onde $|X| = \{ |X| : x \in X \}$ e $\min|X|$ é o extremo inferior do intervalo X .

A Tabela 2 apresenta o Erro Absoluto para os sensores Lambda, TPS e MAP. Salienta-se que o erro é calculado com base nos valores reais e intervalares (através do ponto médio e diâmetro dos intervalos) da Tabela 1.

Sensores	Erro Absoluto
Lambda	$5 \times 10^{-10} < 1,3745 \times 10^{-6}$
TPS	$5 \times 10^{-10} < 1,31595 \times 10^{-5}$
MAP	$7,740015 \times 10^{-3} < 8,1543355 \times 10^{-3}$

Tabela 2. Resultado do Erro Absoluto

Verifica-se que os intervalos solução da Tabela 1 encapsulam os valores reais dos sensores, e através do Erro Absoluto constata-se diferença na 10^a casa decimal, resultado importante o qual ratifica que os intervalos possuem qualidade de representação do valor real.

Na Tabela 3 encontram-se os Erros Relativos dos sensores, calculados a partir dos respectivos Erros Absoluto em relação ao valor real conforme a Tabela 1.

Sensor	Erro Relativo
Lambda	$4,9 \times 10^{-10} \leq 1,34701181 \times 10^{-6}$
TPS	$1,090909 \times 10^{-10} \leq 2,87117188 \times 10^{-6}$
MAP	$9,56056868 \times 10^{-5} \leq 1,00743201 \times 10^{-4}$

Tabela 3. Resultado do Erro Relativo

Verifica-se que os intervalos dos sensores da Tabela 1 apresentam diferença na 10^a casa decimal (para Lambda e TPS) e na 5^a casa para o sensor MAP. Esta diferença em relação ao valor real indica que o intervalo solução apresenta uma boa representação de aproximação do valor real.

Considerando os resultados das medidas de qualidade descritos nas Tabelas 2 e 3, pode-se afirmar que os sensores calculados através da matemática intervalar apresentaram intervalos solução com boa qualidade, o que garante uma excelente representação e exatidão em relação ao valor real. Todavia, verifica-se que a utilização da teoria matemática intervalar apresentou uma exatidão maior, diminuindo os erros e garantindo solução de forma mais confiável, retornando resultados mais precisos para o valor dos sensores. Isso é de suma importância pois, numa situação real, esses resultados tem influência direta no desempenho do motor em seu uso diário.

CONCLUSÃO

Quando se trabalha com computação numérica, um dos fatores de maior importância é a exatidão da resposta desses cálculos. O que sempre se procura são resultados cada vez mais precisos e com um menor erro possível contido neles.

Salienta-se que o foco é a obtenção de maior exatidão em cálculos computacionais e também a necessidade de controlar a propagação dos erros durante todos os processos que envolvem o cálculo, contudo o uso da aritmética intervalar torna-se importante na qualidade dos resultados atingidos, uma vez que os intervalos garantem a sua incerteza.

O presente trabalho propôs uma solução intervalar, através da aplicação da matemática intervalar, nos cálculos operacionais de três importantes sensores do sistema de injeção eletrônica: o sensor de oxigênio - sensor Lambda, o sensor de posição da borboleta-TPS e o sensor de pressão absoluta no coletor de admissão - sensor MAP. Verificou-se, através de exemplos, que é possível obter resultados mais confiáveis e com exatidão máxima através da Teoria Intervalar, obtendo um melhor rendimento para o funcionamento da injeção eletrônica, uma vez que a propagação dos erros inerentes ao processo computacional é controlado pela matemática intervalar.

Uma mistura ar/combustível de qualidade é fundamental para que o motor de um veículo possa ter excelência em seu funcionamento. Tendo isso em vista, efetuar os cálculos de funcionamento da injeção eletrônica com exatidão máxima, através da utilização da matemática intervalar, é de suma importância, já que os resultados reais carregam a incerteza.

Verifica-se, através das medidas de erros (absoluto e relativo), a qualidade do intervalo solução. Os resultados obtidos com a teoria intervalar demonstram que esse tipo de abordagem fornece resultados mais exatos e confiáveis. Na prática, isso implica em melhor eficiência para o rendimento do motor, gerando uma menor quantidade de poluentes emitidos e otimizando o consumo de combustível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo aporte financeiro do Programa de Bolsas de Iniciação Científica FIPE/UFSM.

REFERÊNCIAS

AIRD, Forbes. **Bosch Fuel Injection Systems**. HP Books, 2001J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.

BOSCH. Injeção Eletrônica. Disponível em: <<http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/injecao/index.html>>. Acesso em: 29 jul. 2016.

DENTON, T. **Automobile electrical and electronic systems**. 3rd. ed. Londres: Elsevier, 2004.

FERRARI, Biagio. Injeção é bico Uma simples introdução. Publicado em: 2007. Disponível em: <<http://www.motonline.com.br/tecnica/tecnica-injecao-e-bico.html>> Acesso em: 06 ago 2016.

FIGUEIREDO, Luís F. **Injeção eletrônica**. Publicada em: 14 dez. 2004. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/wmpublicador/Dicas_Conteudo.vxlpub?hnid=34401>. Acesso em: 03 agosto 2016.

KREINOVICH, V., KEARFOTT, R. B., **Applications of Interval Computations: an introduction**. Dordrecht: Kluwer, 1996.

PROTÁSIO, R. B. R., **Implementação de um Sistema de Injeção e Ignição Eletrocnicamente Controlados num motor de Comsutão Interna**, Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

RATSCHEK, H., ROKNE, J., **New Computer Methods for Global Optimization**. Ellis Horwood, 1988.
MOORE, R. E., **Interval Analysis**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1966.

CÁLCULO VIA DISCRETIZAÇÃO DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS DE FIGURAS PLANAS

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 13/03/2020

Arthur Coutinho de Araújo Pereira

Universidade Federal da Paraíba – UFPB,
Centro de Tecnologia
João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/7182255000778134>

Pedro Henrique Tomaz Fernandes

Universidade Federal da Paraíba – UFPB,
Centro de Tecnologia
João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/3672330897342429>

Carlos Antônio Taurino de Lucena

Universidade Federal da Paraíba – UFPB,
Centro de Tecnologia
João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/2275853616275210>

Ângelo Vieira Mendonça

Universidade Federal da Paraíba – UFPB,
Centro de Tecnologia
João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/2283433515334530>

RESUMO: Uma ferramenta computacional disponível para realizar cálculos é sempre bem-vinda. Problemas de determinação das propriedades geométricas de seções transversais formadas por figuras mais complexas podem ser tediosas,

especialmente aquelas com regiões poligonais e setoriais circulares. A solução do problema é geralmente feita pela discretização dessas áreas por elementos triangulares, até mesmo em áreas não poligonais (tais como as setoriais circulares). Neste caso, é necessária a utilização de um grande número desses elementos triangulares para que se aproxime satisfatoriamente o contorno discretizado da geometria circular exata, implicando em um maior número de dados de entrada requerido e um esforço computacional maior já que mais cálculos devem ser processados. Assim, neste artigo tem-se o objetivo de apresentar uma ferramenta simplificadora para o cálculo automatizado de propriedades geométricas de figuras planas mistas utilizando elementos mais apropriados para áreas poligonais e setoriais circulares. Para este fim, um novo elemento (aqui chamado de discoide) é proposto para representar as regiões curvas, sendo que as deduções matemáticas desse elemento são devidamente aqui discutidas. Exemplos representativos são apresentados para diversas seções transversais mistas e os resultados automatizados são comparados com cálculos feitos manualmente.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica. Propriedades Geométricas. Discretização.

CALCULATION BY DISCRETIZATION OF GEOMETRICAL PROPERTIES OF PLANAR FIGURES

ABSTRACT: An available computational tool to perform exhausting calculations is always welcome. Problems in determining the geometric properties of more complex cross sections can be tedious especially those cases containing both polygonal and sectorial circular regions. The solution to the problem is usually done by discretizing these areas by triangular elements, even in non-polygonal areas (such as circular sectors). In this case, it is necessary to use a large number of these triangular elements in order to satisfactorily approach the discretized contour to the exact circular geometry, implying one greater number of input data required and a greater computational cost since more calculations must be processed. Thus, this article aims to present a simplifying tool for the automated calculation of geometric properties of mixed flat figures using elements more appropriate for polygonal and circular sector areas. For this purpose, a new element (called discoid) is proposed to represent the curved regions, and the mathematical derivations for that element are properly discussed. Representative examples are presented for several mixed cross sections and the automated results are compared with calculations done by hand.

KEYWORDS: Mechanics. Geometric Properties. Discretization. Plane Figures.

1 | INTRODUÇÃO

A engenharia das estruturas está intimamente ligada à aplicação dos conceitos de centroide, momento e produto de inércia para análise de estruturas. É por meio do estudo destas propriedades geométricas das seções transversais que se pode entender melhor como as deformações e curvaturas se relacionam com os esforços do ponto de vista da geometria. O cálculo manual dessas propriedades é uma tarefa, que por muitas vezes, pode ser trabalhosa e demorada, já que as formas a serem calculadas podem variar em diferentes formatos e inclinações. Assim, o cálculo computacional pode oferecer vantagens tais como comodidade e qualidade dos cálculos para o usuário.

Do ponto de vista de estratégias de solução, considera-se como polígono qualquer região plana ligada por um conjunto finito de segmentos de linha que formam uma curva simples fechada (O'Rourke, 1998), afirma-se que todo polígono é passível de uma triangulação. Esta afirmação é provada pela existência de uma diagonal neste polígono e tal fato se dá pelos lemas de que todo polígono deve ter ao menos um vértice convexo e de que todo polígono com quatro ou mais lados possui uma diagonal (O'Rourke, 1998).

No entanto, quando a discretização por elementos triangulares é aplicada à áreas não poligonais é necessária a utilização de um grande número desses elementos triangulares para que o contorno discretizado se aproxime satisfatoriamente da geometria circular exata conforme mostrado na Fig. 1.

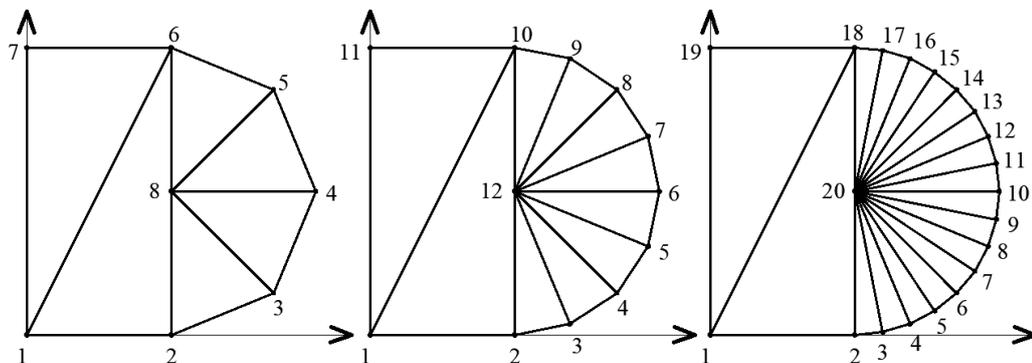


Figura 1. Discretização triangular em figuras não poligonais.

Com o intuito de reduzir o número de elementos a serem discretizados, aliviando o custo computacional, neste trabalho é proposto não só elementos triangulares, mas também discretização com setores de círculos, conforme indicado na Fig 2 de modo a possibilitar a generalização do método do cálculo, assim abrangendo variadas formas de seções transversais.

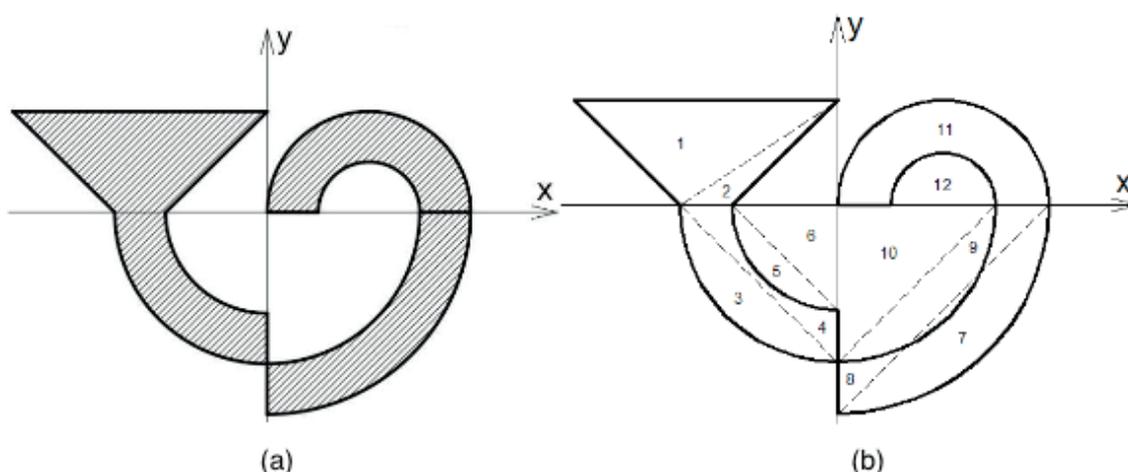


Figura 2. a) Seção real. b) Seção discretizada.

2 | DESENVOLVIMENTO

Nesta seção serão discutidas as etapas necessárias para a determinação das propriedades geométricas das figuras planas, desde deduções matemáticas das propriedades requeridas, passando pela alimentação dos dados de entrada, e finalizando com as validações numéricas.

2.1 Cálculo das propriedades

Algumas propriedades de área de interesse neste artigo são a própria área, os momentos de inércia (I_x, I_y), o produto de inércia (I_{xy}), os momentos estáticos (Q_x, Q_y) e as coordenadas do centroide (\bar{x}, \bar{y}). As figuras mistas de interesse são compostas por regiões poligonais e por setoriais circulares. Primeiramente, serão apresentadas o cálculo das regiões poligonais.

2.1.1 Regiões Poligonais

Para o cálculo das propriedades geométricas das regiões poligonais, a solução é obtida pela discretização em triângulos, cujas expressões apresentadas nesta seção foram obtidas utilizando ferramentas já consolidadas no cálculo analítico de integrações requeridas na dedução de matrizes de rigidez e de massa de alguns elementos finitos triangulares, vide Hutton (2004) e Felippa (2004).

E assim, adotou-se o sistema de coordenadas naturais de triângulo. Considerando o triângulo de área A_e , representado na Fig. 3, tem-se um ponto P interno ao triângulo de coordenadas x, y , sendo $A_1, A_2, e A_3$ e as áreas dos triângulos P23, P31 e P12, respectivamente. Relacionando essas áreas, define-se o ponto P por ϵ_1, ϵ_2 e ϵ_3 :

$$\epsilon_1 = \frac{A_1}{A_e}, \quad \epsilon_2 = \frac{A_2}{A_e}, \quad \epsilon_3 = \frac{A_3}{A_e} \quad (1)$$

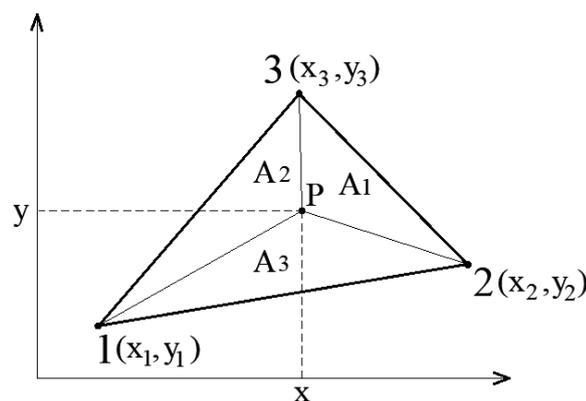


Figura 3. Ponto P.

Assim, sabendo que $A_e = A_1 + A_2 + A_3$ e que (x_i, x_j, x_k) e (y_i, y_j, y_k) são as coordenadas dos vértices dos triângulos, e utilizando a Eq. (1), para o desenvolvimento deste estudo, chega-se nas expressões:

$$x = x_i \epsilon_1 + x_j \epsilon_2 + x_k \epsilon_3, \quad y = y_i \epsilon_1 + y_j \epsilon_2 + y_k \epsilon_3 \quad (2)$$

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 1 \quad (3)$$

Cada ponto dos triângulos será representado pelo conjunto ϵ_1, ϵ_2 e ϵ_3 que são as coordenadas naturais Hutton(2004). Por meio deste sistema de coordenadas, expressões da área, do centroide e dos momentos de uma figura plana podem ser escritas.

2.1.1. 1 Área

Para o cálculo da área dos elementos triangulares, utiliza-se o conhecimento de Produto Vetorial e sua aplicação geométrica no cálculo de uma área através de dois vetores. Tomando \vec{F} e \vec{G} como Eq.(4) e Eq.(5), e as suas respectivas coordenadas referente ao sistema representado na Fig. 4, e fazendo produto vetorial na Eq. (6), chega-se à:

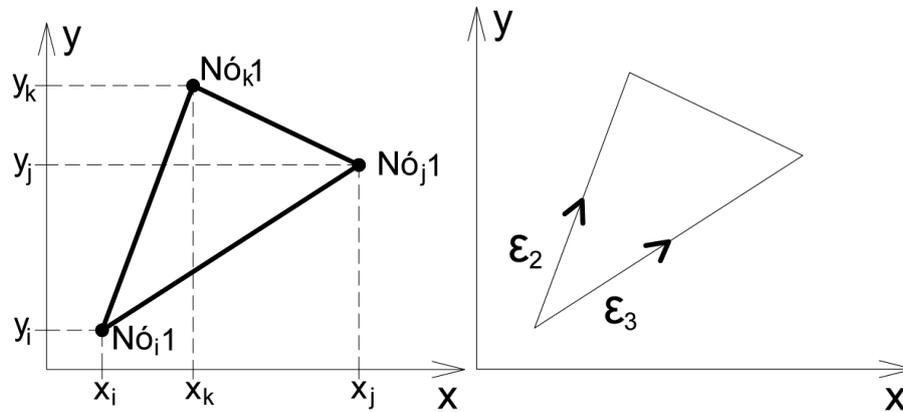


Figura 4. Sistema de coordenadas naturais de triângulo.

$$\vec{F} = (x_j - x_i)\hat{i} + (y_j - y_i)\hat{j} + \vec{0}\hat{k} \quad (4)$$

$$\vec{G} = (x_k - x_i)\hat{i} + (y_k - y_i)\hat{j} + \vec{0}\hat{k} \quad (5)$$

$$\vec{F} \times \vec{G} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ (x_j - x_i) & (y_j - y_i) & 0 \\ (x_k - x_i) & (y_k - y_i) & 0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$A\vec{k} = (x_j - x_i)(y_k - y_i)\vec{k} + (x_k - x_i)(y_j - y_i)\vec{k} \quad (7)$$

Portanto, como se trata de um elemento triangular, tem-se a área dada por:

$$A = \frac{1}{2} [(x_j - x_i)(y_k - y_i) + (x_i - x_k)(y_j - y_i)] \quad (8)$$

2.1.1.2 Momento e produto de Inércia

Por definição, os momentos de inércia em relação aos eixos x e y são dados por:

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad , \quad I_y = \int_A x^2 dA \quad (9)$$

Se o espaço $\epsilon_2\epsilon_3$ para mapear o elemento triangular, com ϵ_2 variando de zero a um e ϵ_3 variando de zero a , a Eq. (9) em função do sistema de coordenadas triangular

homogêneo fica:

$$I_x = \int_0^1 \int_0^{1-\varepsilon_1} (y_i \varepsilon_1 + y_j \varepsilon_2 + y_k \varepsilon_3)^2 |J| d\varepsilon_2 d\varepsilon_3 \quad (10)$$

$$I_y = \int_0^1 \int_0^{1-\varepsilon_1} (x_i \varepsilon_1 + x_j \varepsilon_2 + x_k \varepsilon_3)^2 |J| d\varepsilon_2 d\varepsilon_3 \quad (11)$$

onde,

$$|J| = 2A \quad (12)$$

$$dA = dx dy = |J| d\varepsilon_2 d\varepsilon_3 = 2A d\varepsilon_2 d\varepsilon_3 \quad (13)$$

Expandindo-se (10) resulta em:

$$I_x = \int_A (y_i^2 \varepsilon_1^2 + y_j^2 \varepsilon_2^2 + y_k^2 \varepsilon_3^2) dA + 2 \int_A (y_i y_j \varepsilon_1 \varepsilon_2 + y_i y_k \varepsilon_1 \varepsilon_3 + y_j y_k \varepsilon_2 \varepsilon_3) dA \quad (14)$$

Para dar prosseguimento aos cálculos de interesse, tem-se uma importante relação envolvendo as coordenadas ε_n Hutton(2004):

$$\int_A \varepsilon_1^p \varepsilon_2^q \varepsilon_3^r dA = 2A \frac{p! q! r!}{(p + q + r + 2)!}, \quad i \geq 0, j \geq 0 \text{ e } k \geq 0 \quad (15)$$

De acordo com Felippa(2004), a Eq.(15) somente é válida para triângulos com lados retos e não se aplica a elementos de ordem superior com lados curvos. Com auxílio de (15), a integração requerida em (14) fica:

$$I_x = \frac{A}{6} (y_i^2 + y_j^2 + y_k^2) + \frac{A}{6} (y_i y_j + y_i y_k + y_j y_k) \quad (16)$$

E, analogamente para o I_y dado em (11) resulta em:

$$I_y = \frac{A}{6} (x_i^2 + x_j^2 + x_k^2) + \frac{A}{6} (x_i x_j + x_i x_k + x_j x_k) \quad (17)$$

Uma outra propriedade de área de interesse é o denominado produto de inércia e expresso por:

$$I_{xy} = \int_A xy \, dA \quad (18)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, combinando-se (18) e (2), e ainda realizando a integração com auxílio de (15) resulta em:

$$I_{xy} = \frac{A}{12} (x_k y_i + x_i y_k + x_i y_j + x_j y_i + x_k y_j + x_j y_k) + \frac{A}{6} (x_i y_i + x_j y_j + x_k y_k) \quad (19)$$

Convém notar que os valores encontrados na Eq. (16), (17) e (19) estão associados a um sistema cartesiano (x, y) , com origem arbitrária.

2.1.1.3 Momentos estáticos e centróide de áreas

Por definição os momentos estáticos em relação aos eixos x e y são dados respectivamente por:

$$Q_x = \int_A y \, dA \quad , \quad Q_y = \int_A x \, dA \quad (20)$$

Aplicando a Eq. (2) nas Eq. (20) e ainda com o auxílio de (15), tem-se:

$$Q_x = \frac{A}{3} (y_i + y_j + y_k) \quad , \quad Q_y = \frac{A}{3} (x_i + x_j + x_k) \quad (21)$$

As coordenadas \bar{x} e \bar{y} do centroide de uma área são dadas por:

$$\bar{x} = \frac{\int_A x \, dA}{\int_A dA} \quad , \quad \bar{y} = \frac{\int_A y \, dA}{\int_A dA} \quad (22)$$

2.1.1 Regiões circulares

Diferentemente da solução para regiões poligonais, onde técnicas já consagradas são utilizadas na obtenção das expressões de interesse, no caso das regiões circulares apresenta-se uma nova proposta de soluções específicas para calcular propriedades geométricas de áreas circulares de forma que viabilize abranger variados formatos de figuras. Para isso é necessário encontrar um meio para se calcular as coordenadas \bar{x} e \bar{y} do centro do setor circular que compõe a área circular a ser trabalhada.

2.1.2.1 Coordenadas centrais de um setor circular

Sejam "i", "j" e "k" três pontos em uma circunferência, através dos quais são definidas as retas "r" e "t". Traçando-se perpendiculares a cada uma das retas "r" e "t", a partir do ponto médio de cada uma delas, estas mediatrizes, se interceptam no ponto C, interior, centro da circunferência, vide Fig. 5.

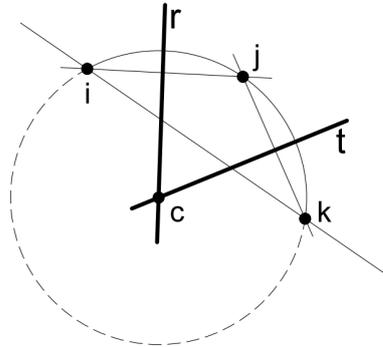


Figura 5. Centro de uma circunferência

Sejam $x_i, x_j, e x_k$ as abscissas referentes ao eixo x destes pontos e $y_i, y_j, e y_k$ as ordenadas referentes ao eixo y . Através da equação da reta: $y = ax + b$, e da reta perpendicular a mesma: $y = -\frac{x}{a} + b$, é possível encontrar as coordenadas do centro da circunferência.

Primeiramente, define-se a equação da reta "r" a partir da localização de dois pontos pertencentes a ela e do determinante da seguinte matriz:

$$\begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (23)$$

$$y = \frac{1}{(x_j - x_i)} - [(y_j - y_i)x - x_i x_j + x_j y_i] \quad (24)$$

Assim, com o valor de a e b tem-se a equação perpendicular à reta "r", e analogamente a da reta "t".

$$y_{r\perp} = \frac{(x_i - x_j)}{(y_j - y_i)}x + \frac{y_j^2 - y_i^2 + x_j^2 - x_i^2}{2(y_j - y_i)} \quad (25)$$

$$y_{t\perp} = \frac{(x_j - x_k)}{(y_k - y_j)}x + \frac{y_k^2 - y_j^2 + x_k^2 - x_j^2}{2(y_k - y_j)} \quad (26)$$

Igualando as expressões das ordenadas das retas "r" e "t", localiza-se a abscissa do centro da circunferência que passa pelos três pontos, i, j e k .

$$x_c = \frac{(y_k - y_j)(y_j^2 - y_i^2 + x_j^2 - x_i^2) - (y_j - y_i)(y_k^2 - y_j^2 + x_k^2 - x_j^2)}{2[(x_j - x_k)(y_j - y_i) - (x_i - x_j)(y_k - y_j)]} \quad (27)$$

A ordenada y_c do centro da circunferência pode ser encontrada substituindo o x da Eq. (25) ou (26) por x_c :

$$y_c = \frac{(x_j - x_k)}{(y_k - y_j)} x_c + \frac{(y_k^2 - y_j^2 + x_k^2 - x_j^2)}{2(y_k - y_j)} \quad (28)$$

2.1.2.2 Área e primeiro momento de um setor circular

Nesta sub-seção é deduzida a expressão para calcular a área de um setor circular a partir do seu raio, do seu ângulo de abertura e das coordenadas de três pontos pertencentes a ele, vide Fig. 6.

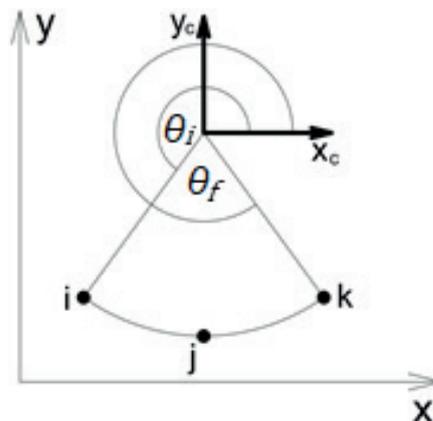


Figura 6. Ângulos de abertura de um setor circular.

A partir da Fig. 6, as seguintes relações podem ser escritas no sistema polar de coordenadas:

$$r = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (29)$$

$$\theta_i = \arccos \frac{x_i - x_c}{r} \quad \text{e} \quad \theta_f = \arccos \frac{x_k - x_c}{r} \quad (30)$$

Assim, a área e os momentos estáticos de área do setor ficam:

$$A = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \int_0^r r dr d\theta = \frac{x_c^2 + y_c^2}{2} \cdot (\theta_f - \theta_i) \quad (31)$$

$$Q_{x_{sc}} = A \cdot (y_{c_{sc}} + y_c) \quad , \quad Q_{y_{sc}} = A \cdot (x_{c_{sc}} + x_c) \quad (32)$$

2.1.2.3 Momento e produto de inércia de um setor circular

Os momentos e produtos de inércia em relação aos eixos (x_c, y_c) escritos no sistema polar de coordenadas são dados:

$$I_{x_c} = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \int_0^r r^3 \cdot \text{sen}^2(\theta) \cdot dr \cdot d\theta = \frac{r^4}{8} \cdot (-\text{sen}(\theta_f) \cdot \cos(\theta_f) + \theta_f + \text{sen}(\theta_i) \cdot \cos(\theta_i) - \theta_i) \quad (33)$$

$$I_{y_c} = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \int_0^r r^3 \cdot \cos^2(\theta) \cdot dr \cdot d\theta = \frac{r^4}{8} \cdot (\cos(\theta_f) \cdot \text{sen}(\theta_f) + \theta_f - \cos(\theta_i) \cdot \text{sen}(\theta_i) - \theta_i) \quad (34)$$

$$I_{x_{y_c}} = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \int_0^r r^3 \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot dr \cdot d\theta = \frac{r^4}{8} \cdot (\text{sen}^2(\theta_f) - \text{sen}^2(\theta_i)) \quad (35)$$

Os valores calculados a partir destas fórmulas são referenciados em relação ao sistema de eixos com origem no centro do setor circular.

2.2 Acúmulo de valores

Calculadas todas as propriedades de cada elemento que compõe a figura, acumulam-se estes valores para que assim seja possível obter um resultado final.

2.2.1 Transportes

Através do Teorema de Steiner, os valores de momento e produto de inércia são transportados de um eixo para outro eixo paralelo com o objetivo de encontrar um valor final para o sistema de eixos globais da figura composta.

2.2.1.1 Regiões triangulares

Os momentos e o produto de inércia destes elementos foram calculados através da Eq. (16), (17) e (19) referentes a um dado sistema de eixos inicial. No entanto, em muitos casos são requeridos que os momentos e produtos de inércia sejam determinados em relação aos eixos centroidais da figura total. Após a determinação das coordenadas do centróide, aplicando-se o Teorema de Steiner (Teorema de Eixos Paralelos), as contribuições de cada elemento são transportadas para os eixos centroidais globais.

2.2.1.2 Regiões circulares

As regiões triangulares, como exemplo Fig. 7, passam por três transportes até que os seus valores de momentos e do produto de inércia sejam acumulados até seus valores finais.

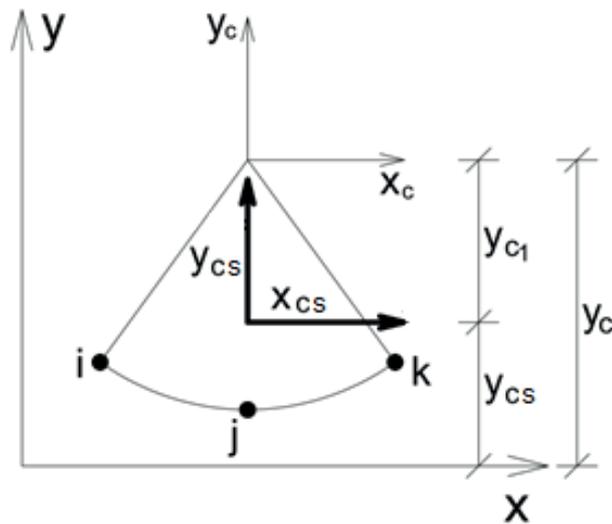


Figura 7. Distâncias entre eixos.

O primeiro transporte se dá do eixo localizado na origem do setor circular, ou seja, do centro do setor para os seus eixos centroidais. Utilizando-se da Eq. (22) e do sistema de coordenadas polares, é possível deduzir que as coordenadas do centroide do setor circular são dadas por:

$$x_{cs} = \frac{2 \cdot r \cdot \sin(\theta_f) - \sin(\theta_i)}{3 \cdot (\theta_f - \theta_i)} \quad , \quad y_{cs} = \frac{-2 \cdot r \cdot \cos(\theta_f) - \cos(\theta_i)}{3 \cdot (\theta_f - \theta_i)} \quad (36)$$

Com essas relações chega-se aos momentos e produto de inércia centroidais do setor:

$$I_{xs} = I_x - Ay_{cs}^2 \quad , \quad I_{ys} = I_y - Ax_{cs}^2 \quad , \quad I_{xys} = I_{xy} - Ax_{cs}y_{cs} \quad (37)$$

A partir daí, é feito um novo transporte, o qual integrará o valor dos momentos e produto de inércia das regiões triangulares e circulares que compõem a figura total nas variáveis finais, obtendo o valor final destas propriedades no eixo centroidal global. O transporte é dos eixos centroidais do setor circular para os eixos globais, cuja nova distância é:

$$d_x = x_{cs} + x_c \quad , \quad d_y = y_{cs} + y_c \quad (38)$$

Dessa forma os momentos de inércia e produto de inércia com relação aos eixos globais são:

$$I_{xg} = I_{xs} + Ad_y^2 \quad , \quad I_{yg} = I_{ys} + Ad_x^2 \quad , \quad I_{xyg} = I_{xys} + Ad_x d_y \quad (39)$$

Calculadas todas as propriedades de cada elemento que compõe a figura, deve-se somar estes valores para, assim, obter um resultado final.

$$I_x = \sum_{i=1}^{nt} I_{xg} + \sum_{i=1}^{ns} I_{xg} \quad , \quad I_y = \sum_{i=1}^{nt} I_{yg} + \sum_{i=1}^{ns} I_{yg} \quad , \quad I_{xy} = \sum_{i=1}^{nt} I_{xy} + \sum_{i=1}^{ns} I_{xy} \quad (40)$$

Onde nt e ns são as quantidades de triângulos e setores circulares, respectivamente.

2.3 Momentos principais de inércia

A determinação dos momentos principais de inércia e respectivos eixos principais tem grande importância, já que representam os valores máximo e mínimo de momentos de inércia na figura. Os ângulos de inclinação podem ser calculados a partir dos momentos e produto de inércia dada em (40) resultando em:

$$2\theta_1 = \arctan\left(\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y}\right) \quad (41)$$

$$2\theta_2 = 2\theta_1 + \pi \quad (42)$$

Os momentos máximo e mínimo de inércia são dados por:

$$I_1 = \frac{I_x + I_y}{2} + \left(\frac{I_x - I_y}{2}\right) \cos(2\theta_1) - I_{xy} \sin(2\theta_1) \quad (43)$$

$$I_2 = \frac{I_x + I_y}{2} + \left(\frac{I_x - I_y}{2}\right) \cos(2\theta_2) - I_{xy} \sin(2\theta_2) \quad (44)$$

2.4 Breve descrição do código desenvolvido

As expressões deduzidas na sub-seção 2.1 foram implementadas em um código computacional para melhor avaliar seus resultados.

Primeiramente, as regiões poligonais da figura a ser trabalhada deverá ser discretizada e terá cada triângulo formado enumerado. Os vértices dos triângulos serão enumerados

também e chamados de "Nó i ", "Nó j " e "Nó k ". Em seguida, são necessárias as coordenadas de cada "Nó" em relação ao sistema de referência .

Cada triângulo compreenderá uma parte da área da figura e se esta for "cheia" os "Nó i ", "Nó j " e "Nó k " deverão ser informados no sentido anti-horário, conforme Fig. 8. Já para os triângulos que compreenderão uma parte da área da figura que for vazada, a orientação dos "Nós" deverá ser informada no sentido horário.

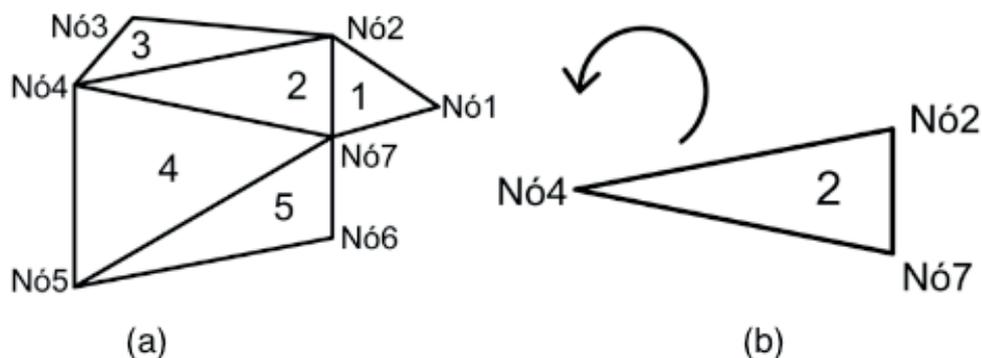


Figura 8. a) Discretização. b) Orientação.

Se a figura plana de interesse possuir uma área circular, esta deverá ser discretizada em setores circulares, os quais deverão ser divididos em um triângulo e em uma região circular. Assim, para essa região deverão ser nomeados e enumerados três "Nós", um no seu início, outro no final e um no meio, que pode estar em qualquer ponto delimitado pelo "Nós" do início e do fim. Propriedades da região triangular do setor serão excluídas do resultado final durante a execução do código por meio de uma troca de ordem na informação dos "Nós".

O semicírculo e a região circular do setor terão suas propriedades preservadas e as coordenadas dos seus "Nós" deverão ser informadas seguindo a norma dos sentidos anti-horário e horário para áreas cheias e vazadas, de forma semelhante aos setores triangulares, como é visto na Fig.9.

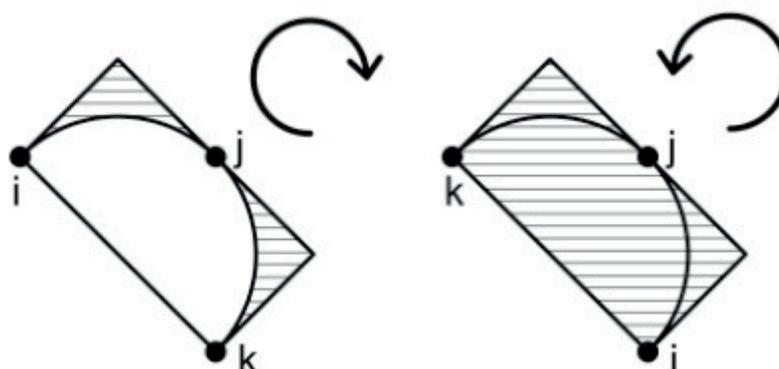
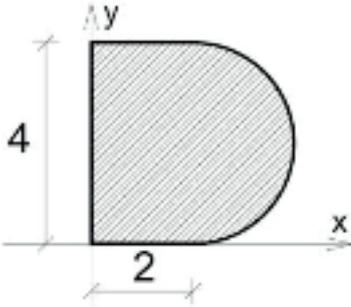
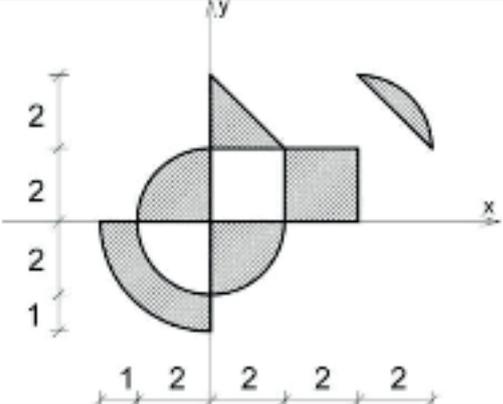
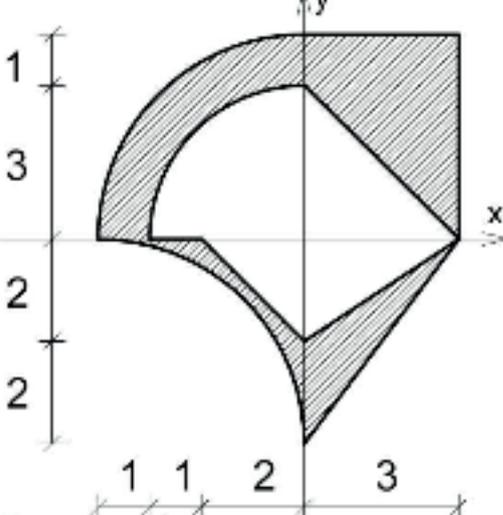


Figura 9. Figura de setor circular "cheio" (sentido anti-horário) e de setor circular "vazado" (sentido horário).

2.5 Validação numérica

Nesta sub-seção são apresentados os resultados computacionais e comparados com aqueles obtidos por cálculo feitos manualmente. Na Tabela 1 são mostradas as propriedades em relação aos eixos x, y . Já na Tabela 2, também estão incluídos os momentos principais de inércia e os ângulos de seus respectivos eixos.

Exemplo	Calculado pelo código	Calculado manualmente
	$A = 14,28318530 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 1,813300 \text{ m}$ $Y_{cg} = 2,000000 \text{ m}$ $I_x = 16,949852 \text{ m}^4$ $I_y = 16,451986 \text{ m}^4$	$A = 14,28 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 1,80 \text{ m}$ $Y_{cg} = 2,00 \text{ m}$ $I_x = 16,94 \text{ m}^4$ $I_y = 16,33 \text{ m}^4$
	$A = 17,3517687 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,743422996 \text{ m}$ $Y_{cg} = 0,3813166672 \text{ m}$ $I_x = 48,230879898 \text{ m}^4$ $I_y = 78,863044004 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 33,00553577 \text{ m}^4$	$A = 17,35168 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,74307 \text{ m}$ $Y_{cg} = 0,3813 \text{ m}$ $I_x = 48,2421 \text{ m}^4$ $I_y = 78,5432 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 32,7405 \text{ m}^4$
	$A = 17,431416 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,1395267630 \text{ m}$ $Y_{cg} = 1,382493255 \text{ m}$ $I_x = 75,633973724 \text{ m}^4$ $I_y = 71,1110741335 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 3,8256404091 \text{ m}^4$	$A = 17,4314 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,1395 \text{ m}$ $Y_{cg} = 1,3825 \text{ m}$ $I_x = 75,6339 \text{ m}^4$ $I_y = 71,103 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 3,8256 \text{ m}^4$

	$A = 20,13716694 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,02109422 \text{ m}$ $Y_{cg} = -0,3310627 \text{ m}$ $I_x = 61,47395743 \text{ m}^4$ $I_y = 115,8549715 \text{ m}^4$	$A = 20,1369 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,02115 \text{ m}$ $Y_{cg} = -0,3310 \text{ m}$ $I_x = 61,5034 \text{ m}^4$ $I_y = 115,876 \text{ m}^4$
--	---	---

Exemplo	Calculado pelo código	Calculado manualmente
	$A = 26,00 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,3297647533 \text{ m}$ $Y_{cg} = -0,066753827 \text{ m}$ $I_x = 180,94627894 \text{ m}^4$ $I_y = 191,682863843 \text{ m}^4$ $I_{xy} = -69,49818506 \text{ m}^4$ $I_1 = 256,0197813 \text{ m}^4$ $I_2 = 116,6093614 \text{ m}^4$	$A = 26,00 \text{ m}^2$ $X_{cg} = -0,323 \text{ m}$ $Y_{cg} = -0,066 \text{ m}$ $I_x = 180,945 \text{ m}^4$ $I_y = 191,680 \text{ m}^4$ $I_{xy} = -69,498 \text{ m}^4$ $I_1 = 256,017 \text{ m}^4$ $I_2 = 116,607 \text{ m}^4$
	$A = 17,42699081 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,794422729 \text{ m}$ $Y_{cg} = 0,594261774 \text{ m}$ $I_x = 62,240430736 \text{ m}^4$ $I_y = 63,93034254 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 30,33918185 \text{ m}^4$ $I_1 = 93,43633236 \text{ m}^4$ $I_2 = 32,73444092 \text{ m}^4$	$A = 17,42690 \text{ m}^2$ $X_{cg} = 0,79847 \text{ m}$ $Y_{cg} = 0,59040 \text{ m}$ $I_x = 62,8298 \text{ m}^4$ $I_y = 64,5183 \text{ m}^4$ $I_{xy} = 29,7405 \text{ m}^4$ $I_1 = 93,426 \text{ m}^4$ $I_2 = 33,922 \text{ m}^4$

Tabela 2. Validação numérica(unidades em m)

Pode-se notar que os valores encontrados pelo código são consistentes com aqueles calculados manualmente

r_{\perp} reta perpendicular a "r"
 c_{sc} índice do centroide do setor
circular
 c coordenada x do centro do
setor circular

Sobrescritos

p índice exponencial
 q índice exponencial
 r índice exponencial

REFERÊNCIAS

Beer, P. F., Johnston, E. R. Jr., Mazurek, D. F. e Cornwell, P. J. Eisenberg, E. R., 2010. **Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics**, 9th edition. The McGraw-Hill Companies. Avenue of the Americas, New York.

Felippa, C. A., 2004. "Introduction to Finite Element Methods". Department of Aerospace Engineering Sciences and Center for Aerospace Structures, University of Colorado, USA.

Hibbeler, R. C., 2011. **Estática: Mecânica para Engenharia**. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 12^a edição.

Hutton, D., 2004. **Fundamentals of Finite Element Analysis Method**. McGraw-Hill, Second Edition.

O'Rourke, J., 1998. **Computational Geometry in C**. Cambridge University Press, United Kingdom, 2nd Edition.

UTILIZANDO A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER NA IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO NÃO LINEAR EM SISTEMAS DINÂMICOS

Data de aceite: 19/06/2020

Marcelo Henrique Belonsi

Universidade Estadual de Goiás, Instituto Acadêmico de Educação, Licenciaturas e Humanidades
Morrinhos – Go

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1430-2056>

Maria Francisca da Cunha

Universidade Estadual de Goiás, Instituto Acadêmico de Educação, Licenciaturas e Humanidades
Morrinhos – Go

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0943586067297134>

Manoel Moraes Junqueira

Universidade Estadual de Goiás, Instituto Acadêmico de Educação, Licenciaturas e Humanidades
Morrinhos – Go

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1125102362304422>

RESUMO: A análise de vibrações mecânicas (lineares e não lineares) compõem um dos objetos de pesquisas de inúmeros trabalhos científicos. Isso se deve ao fato de que as vibrações mecânicas estarem presentes em todo os tipos de estruturas mecânicas influenciando-as sob as mais diversas formas e, em diferentes níveis, incidindo

diretamente, assim, em sua vida útil, na segurança, bem como na operação de máquinas e equipamentos, etc. Diante disso, este trabalho visa utilizar a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*) com vistas a identificar e caracterizar o fenômeno não linear. Dessa forma, é necessário que o efeito não linear atuante no sistema seja disposto na equação do movimento como uma força de perturbação do sistema conservativo, possibilitando assim controlar a evolução do efeito não linear sobre o sistema dinâmico e, por consequência aplicar a FFT. Permitindo, assim, identificar o efeito não linear, bem como a evolução de sua caracterização.

PALAVRAS-CHAVE: Análise dinâmica. Equação Diferenciais. Método de Newmark. Não linearidades.

USING FOURIER'S FASTTRANSFORMED TO IDENTIFY NONLINEAR PHENOMENON IN DYNAMIC SYSTEMS

Abstract: The analysis of mechanical vibrations (linear and nonlinear) is one of the objects of research in numerous scientific works. This is due to the fact that mechanical vibrations are present in all types of mechanical structures, influencing them in the most diverse forms and at different

levels, directly affecting their useful life, safety, as well as the operation of machines and equipment, etc. This work aims to use the Fast Fourier Transform (FFT) in order to identify and characterize the nonlinear phenomenon in dynamic systems incorporating nonlinearities. Thus, it is necessary that the nonlinear effect acting on the system be disposed in the equation of movement as a disturbing force of the conservative system, making it possible to control the evolution of the nonlinear effect on the dynamic system in order to allow the application of FFT. As a consequence, it is possible to identify the non-linear effect as well as the evolution of its characterization.

KEYWORDS: Dynamical analysis. Differential Equation. Newmark method. Nonlinearities.

1 | INTRODUÇÃO

A dinâmica não linear é uma teoria matemática que estuda sistemas de equações de evolução, ou seja, equações onde o tempo é uma variável independente (WIGGINS, 1990). Se tais equações forem lineares, há soluções gerais que nos permitem determinar o comportamento futuro do sistema descrito de forma exata, em função do seu estado atual. Porém, no trato de equações não lineares, essas soluções exatas, em geral, não existem na forma fechada.

Diante disso, a dinâmica não linear concentra-se nos comportamentos a longos períodos do sistema que está sendo estudado (ALLIGOOD, SAUER e YORKE, 1997) e (SAVI, 2010), porém este estudo específico terá foco no comportamento futuro a pequenos tempos, normalmente, obtido por solução numérica (computacional) das equações de evolução.

Por outro lado, o campo de aplicações da dinâmica não linear é muito extenso, abrangendo os sistemas físico, biológico, das ciências sociais, etc. que possam ser descrito por equações de evolução (VIANA, 2011). Porém, neste trabalho, especial atenção será dada a sistemas matemáticos, físicos ou da mecânica clássica incorporando incertezas paramétricas.

Levando-se em consideração, a variabilidade de parâmetros físicos e/ou geométricos, certamente, tais incertezas incorrerão nas respostas dos modelos numéricos representativos dos sistemas. Além disso, hipóteses equivocadas sobre condições de contorno ou sobre a linearidade do sistema em análise pode ser feita, o que resulta nas chamadas incertezas de modelo. Portanto, fica evidente que, para aumentar a representatividade desses modelos preditivos, é extremamente importante quantificar tais incertezas (SOIZE, 2013).

Assim, no sentido de quantificar incertezas em sistemas dinâmicos é possível destacar o trabalho de Lima e Sampaio (2017) cujo objetivo visa caracterizar, a partir de ponto de vista estatístico, a resposta do oscilador de fricção a seco a partir de uma sequência de modos adesivo e deslizante e de Cunha Jr. e Sampaio (2015) quando propõem estudar o efeito do fenômeno não linear em um sistema dinâmico composto por uma barra elástica, presa a molas e uma massa concentrada, com módulo elástico aleatório quando submetida a uma força externa distribuída de amplitude aleatória.

Todavia, a análise de vibrações em sistemas não lineares torna-se potencialmente

importante no caso de sistemas mecânicos industriais. Diante disso, Caetano (1992), Gonçalves (2004) e Ritto (2005) sugerem caracterizar a análise de um sinal no domínio da frequência por meio de sua decomposição num conjunto finito ou infinito de harmônicos de amplitude e frequência variáveis, sendo a via imediata através de sua decomposição espectral, no caso de funções periódicas, utilizando a expansão em série de Fourier.

Assim, inúmeros pesquisadores como Savi (2010) e Viana (2011), dedicam seus estudos no sentido de descrever algumas propriedades dos sistemas dinâmicos não lineares tais como: estabilidade, equilíbrio, caoticidade, etc, outros, porém, focam seus estudos no tratamento de incertezas paramétricas e não paramétricas associadas aos sistemas dinâmicos não lineares (SOIZE, 2013; CUNHA JR e SAMPAIO, 2015; LIMA e SAMPAIO, 2017).

Existem, ainda, aqueles que buscam estabelecer padrões para identificar a ocorrência do fenômeno não linear em sistemas dinâmicos, conforme se observa nos trabalhos de Caetano (1992) e Gonçalves (2004).

Diante disso, este trabalho visa, além da caracterização do fenômeno não linear a partir de parâmetros aleatórios, o estudo interessa-se, particularmente na identificação e evolução do comportamento não linear em sistemas dinâmicos não lineares. Assim, este trabalho vem corroborar com os trabalhos disponíveis na literatura científica no sentido de incorporar incertezas em sistemas dinâmicos com vistas a induzir o efeito não linear a fim de caracterizar sua evolução durante seu processo de operação ao longo do tempo.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia, inicialmente, perpassa por uma extensa pesquisa bibliográfica, especialmente, em artigos científicos, para a apropriação dos conhecimentos já disponibilizados nas literaturas especializadas (MENDONÇA, 2003).

O desenvolvimento se dará por meio de implementação de diversas rotinas computacionais e métodos numéricos de resolução de equações diferenciais, como por exemplo o Método de Newmark, como também pela implementação da FFT de um sinal periódico.

Diante disso, pressupõe-se o estreitamento da técnica de resolução de equações diferenciais e a transformada de Fourier.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fenômenos não lineares são acontecimentos correntes em vários ramos da engenharia prática, sendo o comportamento linear de tal sorte, uma exceção. Entretanto, a característica potencialmente imprevisível de um sistema não linear pode levá-lo com mais facilidade a uma falha catastrófica. Por exemplo, em construções civis, durante eventos esportivos e concertos, as construções em concreto armado podem estar sujeitas a oscilações não lineares devido ao relaxamento das articulações e ao movimento das armações.

Na indústria aeronáutica, os movimentos não lineares podem ter graves consequências sobre a vida útil de peças e componentes estruturais como fuselagens e asas. Já na indústria automobilística, os sistemas de freio e suspensão do motor, por exemplo, possuem inerentemente um comportamento não linear (GERGES, 2013).

Neste contexto, observa-se que os pesquisadores são confrontados a sistemas não lineares em um momento ou outro de sua vida profissional e devem ser capazes de reconhecê-los. A partir do momento em que uma das hipóteses de linearização não é mais válida, o sistema de equações diferenciais do movimento do sistema dinâmico passa a não ser mais válido e, a aplicação do princípio da superposição modal não é mais aplicável.

O oscilador de Duffing ilustrado na Fig. 1(a) representa o tipo de não linearidade foco deste estudo, sendo modelada por meio da equação do movimento (1), onde k_{nl} representa a rigidez não linear, podendo ser negativa ou positiva.

$$m\ddot{u}(t) + b\dot{u}(t) + k u(t) + k_{nl} u^3(t) = f(t) \quad (1)$$

A Fig. 1(b) representa as respostas do oscilador para vários valores de k_{nl} . Pode-se notar a importância de se considerar a contribuição do termo não linear, que evolui com o nível da excitação. A Fig. 1(c) mostra a contribuição da rigidez não linear sobre os níveis de excitação onde nota-se uma evolução não proporcional da resposta harmônica com relação à excitação.

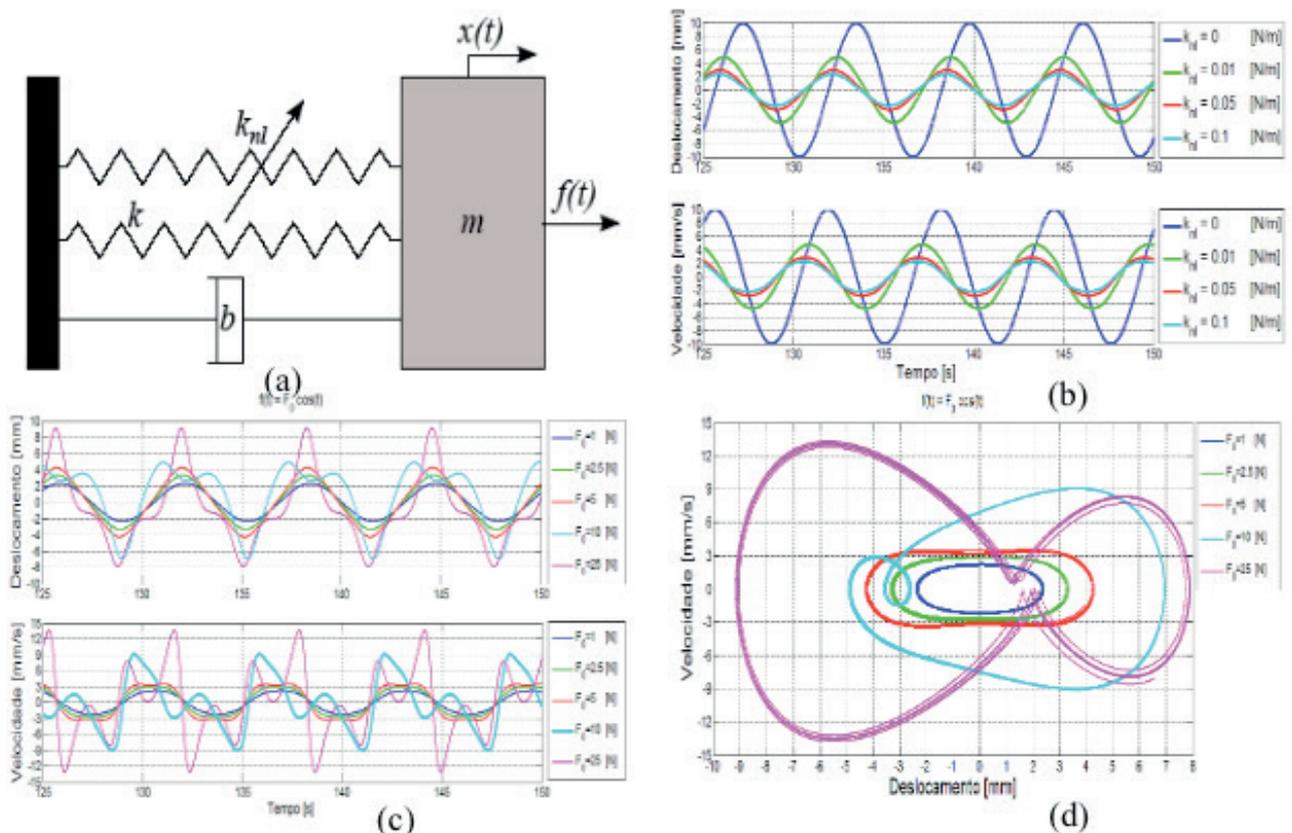


Figura 1 – (a) Oscilador de Duffing; (b) contribuição do termo k_{nl} para excitação tipo $f(t) = \cos(t)$ [N]; (c) resposta temporal para vários níveis de excitação, $k_{nl} = 0,1$ [N/m]; (d) diagrama de fase para $k_{nl} = 0,1$ [N/m].

A Fig. 1(d) representa os diagramas de fase onde é observado claramente o aparecimento de um segundo harmônico a partir do nível de excitação de $F_0=5$ N, ficando mais evidente com o aumento destes. O diagrama de fase traduz a característica periódica da solução obtida e a distorção observada está ligada ao aparecimento do segundo harmônico.

Por outro lado, Caetano (1992), Gonçalves (2004) e Ritto (2005), afirmam que análise de um sinal pode processar-se no domínio da frequência por meio de sua decomposição num conjunto finito ou infinito de harmônicos de amplitude e frequência variáveis. A via mais imediata de proceder tal decomposição, no caso de funções periódicas, consiste na utilização da expansão em série de Fourier, definida como segue:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (2)$$

sendo $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$, $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi n t/T) dt$ e $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi n t/T) dt$,

em que a_n e b_n são ilustrados na Fig. 2 e, representam a composição de $x(t)$ em termos dos harmônicos em $\omega_n = 2\pi n/T$, com $n=1,2,3,\dots$.

De acordo com Caetano (1992) para representar um sinal periódico é necessário combinar uma ou mais funções periódicas, conforme a Eq. (2), afetando assim, a condição de linearidade da aproximação. Portanto, tal combinação se apresenta na transformada de Fourier por meio de diversos harmônicos com o objetivo de representar os coeficientes a_n e b_n .

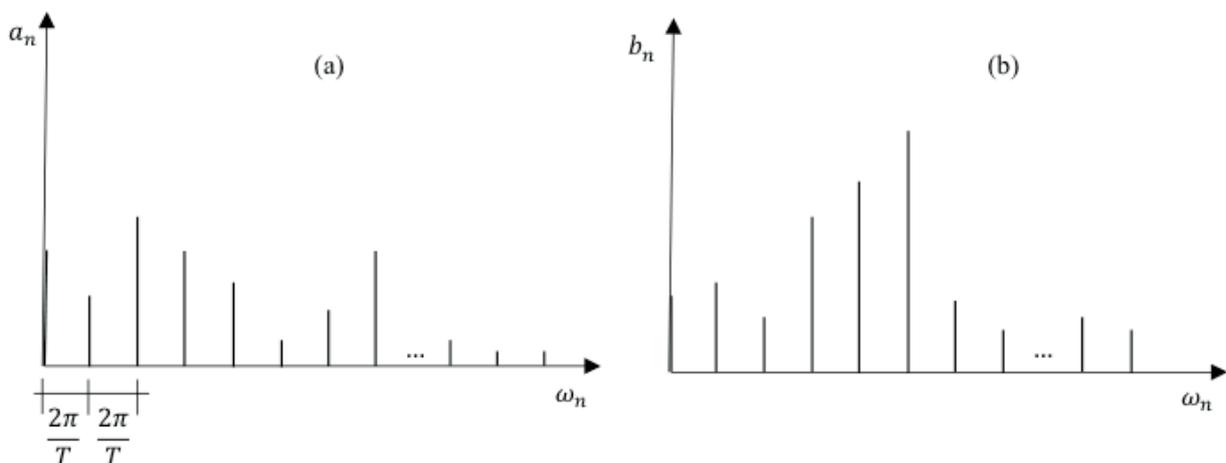


Figura 2–Representação dos termos (a) a_n e (b) b_n . (Adaptado de Caetano (1992))

Diante disso, é possível identificar o fenômeno não linear através da análise dos harmônicos presentes no sinal. Nesse sentido, Souza (2008) utiliza, dentre outras, a

técnica da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) para identificar e caracterizar não linearidades em sistemas dinâmicos.

Assim, a título de ilustração, a Fig. 3 mostra a amplitude das funções de resposta em frequência normalizadas do modelo de Duffing obtidas a partir da FFT do sinal do deslocamento para diferentes valores de rigidez não linear e amplitude de excitação igual a 50N. Nota-se a presença de harmônicos à medida que o efeito não linear se torna mais presente, sob as mesmas condições iniciais.

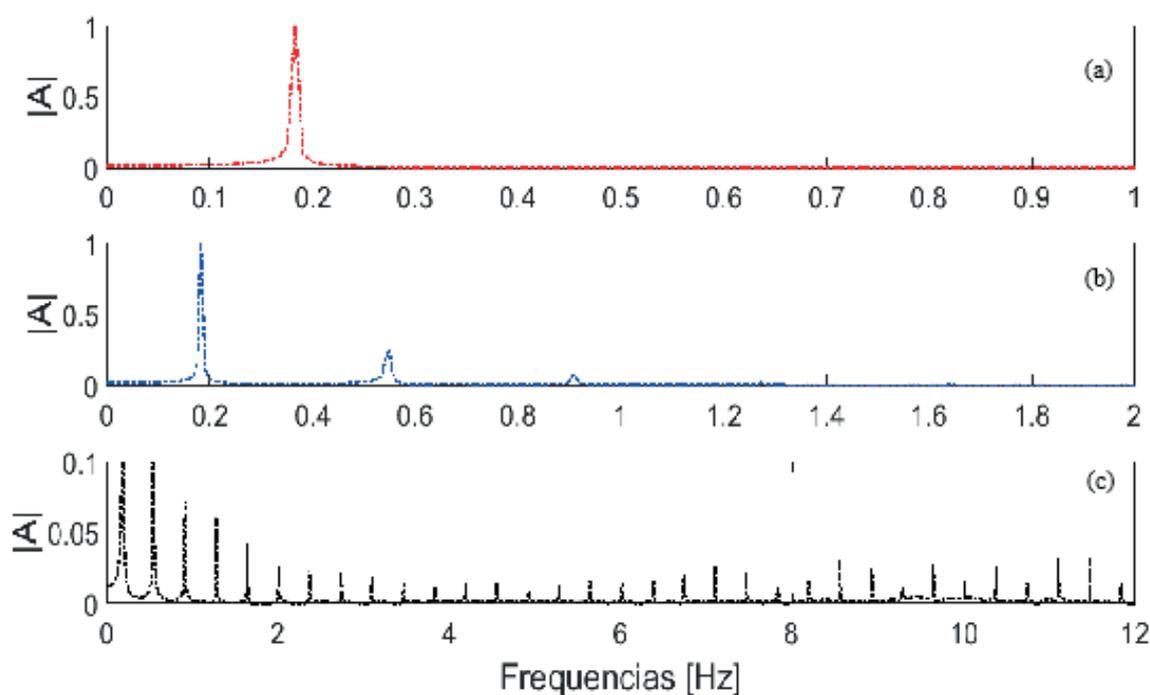


Figura 3 – FFT do sinal do deslocamento para o modelo de Duffing: (a) $k_{nl} = 0 \text{ N/m}$;

(b) $k_{nl} = 10^{01} \text{ N/m}$; (c) $k_{nl} = 10^6 \text{ N/m}$

O modelo de Duffing, Fig. 2, apresenta resposta dinâmica levando-se em conta o fator de não linearidade cúbica incorporado, bem como o efeito não linear advindo da excitação externa aplicada ao sistema mecânico, conforme ilustra a Fig. 2 (b,c). Analisando conjuntamente as Figs. 2 e 3, observa-se a partir da Fig. 3(a) $k_{nl} = 0 \text{ N/m}$, um pico de amplitude de sinal da FFT, predominado, dessa forma, o comportamento linear no sistema não linear.

Nessa mesma perspectiva de análise a Fig. 3(b) evidencia a presença de pelo menos três harmônicos distintos (3 picos), caracterizando assim um comportamento não linear no sistema, isto já sendo esperado conforme ilustrado na Fig. 2(c,d). Finalmente, na Fig. 3(c), quando se considera um alto fator de rigidez à contribuição não linear, observa-se o surgimento de inúmeros harmônicos ilustrando, fortemente, o comportamento não linear no sistema não linear.

Observa-se ainda, que em baixos valores de rigidez não linear, o sistema apresenta comportamento não linear, conforme o tipo e o nível de excitação externa.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Convém salientar que este trabalho se encontra em fase preliminar de estudo. Assim, apresenta-se, apenas, os resultados parciais, relacionados ao modelo determinístico aplicado a um típico sistema mecânico de um grau de liberdade incorporando um tipo de não linearidade induzida de terceiro grau.

Segundo Souza (2008) para identificar a presença do efeito não linear em um sistema dinâmico por meio da FFT é necessário que a resposta obtida via transformada demonstre a existência de diferentes harmônicos em uma faixa de frequência de interesse, ou a presença de harmônico distorcido, equivalendo a existência de diferentes harmônicos em uma pequena vizinhança de uma frequência específica.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a metodologia proposta para identificar a presença do fenômeno não linear incorporado ao sistema apresentou-se de forma satisfatória e eficiente (no sentido de identificação da presença de não linearidade a partir da análise a posteriori da resposta do sinal da equação de estado).

Contudo, uma demanda maior de análise e aprimoramento do método deve ser, ainda, desenvolvida, para a questão da caracterização do nível de não linearidade incorporada ao sistema.

De forma geral, existem sistemas não lineares que exibem o efeito não linear tão suaves que estes podem ser transformados em sistemas lineares sem, contudo, perderem suas características. Quando isso não é possível, é fundamental utilizar um modelo não-linear para representar a dinâmica do sistema.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Goiás pelo acolhimento da proposta de pesquisa e disponibilidade de recursos, ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia, por disponibilizar recursos e equipamentos para desenvolvimento de parte da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLIGOOD, K.; SAUER, T.; YORKE, J. A. **Chaos: an introduction to dynamical systems**. 1. ed. New York: Springer Verlag, 1997.

CAETANO, E. D. S. **Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais**. Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 234. 1992.

CUNHA JR, A.; SAMPAIO, R. **On the nonlinear stochastic dynamics of a continuous system with discrete attached elements**. Elsevier - Applied Mathematical Modelling, v. 39, n. 2, p. 809-819, 2015.

GERGES, Y. **Méthodes de reduction de modèles en vibroacoustique non-linéaire**. Besançon: [s.n.], 2013.

GONÇALVES, L. A. **Um Estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em Processamento de Imagens**. URGs-Instituto de Matemática. Porto Alegre. 2004.

LIMA, R.; SAMPAIO, R. **Construction of a statistical model for the dynamics of a base-driven stick-slip oscillator**. Elsevier - Mechanical Systems and Signal Processing, p. 157–166, 2017.

MENDONÇA, A. F. D. E. A. **Metodologia científica: guia para elaboração e apresentação de trabalhos acadêmicos**. Goiânia : Faculdades Alves Faria, 2003.

RITTO, T. G. **Análise de Vibrações de Sistemas Lineares e Não-Lineares no Contexto da Formulação Fraca, Análise Modal e Decomposição de Karhunen-Loève**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

SAVI, M. A.. **Introdução à Dinâmica Não-linear e Caos**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2010.

SOIZE, C. **Stochastic modeling of uncertainties in computational structural dynamics - recent theoretical advances**. Journal of Sound and Vibration, v. 332, p. 2379-2395, 2013.

SOUZA, M. G. D. **Identificação e caracterização de não-linearidades em dinâmica estrutural**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

VIANA, R. L. **Introdução à Dinâmica Não-Linear e Caos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 269. 2011.

WIGGINS, S. **Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos**. 1. ed. New York: Springer Verlag, 1990.

WORDEN, K.; TOMLINSON, G. **Nonlinearity in structural dynamic: detection, identification, and modeling**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2001.

DIMENSIONAMENTO DE PISTÃO MAGNETO REOLÓGICO UTILIZANDO ANÁLISE NUMÉRICA

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 06/03/2020

Lays Cristina Gama Lopes

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Mecânica
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/7328489102514899>

Luiz Fernando Cótica

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Física
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/0807675554407664>

Ivair Aparecido dos Santos

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Física
Maringá – PR
<http://lattes.cnpq.br/3989136572460030>

RESUMO: Dispositivos magneto reológicos – MR vêm recebendo uma atenção especial nos últimos anos, por serem mecanismos de controle muito promissores, que utilizam fluido MR para controlar o movimento. Os fluidos MR consistem em micropartículas magneticamente polarizáveis, dispersas em um fluido transportador, formando uma suspensão coloidal. Quando um campo magnético é aplicado aos fluidos MR, as partículas respondem a esse campo com

elevada intensidade de indução ao campo magnético aplicado, apresentando um momento de dipolo paralelo à direção das linhas de fluxo de campo magnético, que farão com que elas se atraiam fortemente umas com as outras, formando uma estrutura em forma de corrente, alterando sua reologia de um fluido praticamente newtoniano para um semissólido que apresenta comportamento visco plástico. Esta capacidade do fluido MR alterar reversivelmente e instantaneamente sua viscosidade de um fluido para um semissólido de maneira controlável e proporcional ao campo magnético aplicado, permite o controle sobre a resistência que um mecanismo apresenta ao movimento. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um pistão MR utilizado para o controle de força aplicada sobre sua haste. As dimensões do pistão deveriam ser tais que suprissem as necessidades do projeto, evitando o superdimensionamento por meio da análise numérica. O objetivo foi atingido.

PALAVRAS-CHAVE: Fluido Magneto Reológico. Pistão MR. Análise Numérica. Suspensão Coloidal. Fluido Visco Plástico.

MAGNETO REOLOGICAL PISTON SIZING USING NUMERICAL ANALYSIS

ABSTRACT: Magneto rheological - MR

devices have received special attention in recent years, this is because they are very promising control mechanisms that use MR fluid for controlling movement. MR fluids consist of magnetically polarizable microparticles, dispersed in a carrier fluid, forming a colloidal suspension. When a magnetic field is applied to MR fluids, the particles respond to that field with high intensity of induction to the applied magnetic field, presenting a parallel dipole moment to the direction of the magnetic field flow lines, which will cause to the particles a strong attraction, forming a chain-shaped structure, changing its rheology from a practically Newtonian fluid to a semi-solid that exhibits visco-plastic behavior. This ability of the MR fluid to change reversibly and instantly its viscosity from a fluid to a semi-solid in a way that is controllable and proportional to the applied magnetic field, allows control over the resistance that a device presents to the movement. The objective of this work is the development of an MR piston used to control the force applied on its rod. The dimensions of the piston should be such that they meet the needs of the project, avoiding over-dimensioning through numerical analysis. The objective has been achieved.

KEYWORDS: Magneto Rheological Fluid. MR Piston. Numerical Analysis. Colloidal Suspension. Visco Plastic Fluid.

1 | INTRODUÇÃO

Dispositivos de controle de vibrações se dividem em três grupos básicos de acordo com o modo de atuação, podendo ser de controle passivo, ativo ou semiativo. Dispositivos de controle semiativo vêm atraindo a atenção da comunidade científica por serem capazes de gerar força de controle de forma passiva através da dissipação ou armazenamento da energia produzida pelo sistema. No entanto, é possível que a intensidade da força seja controlada de maneira ativa por um sinal de controle que ajusta as propriedades mecânicas, em tempo real, de acordo com a necessidade do sistema.

Um pistão semiativo pode ter a intensidade da força que gera controlada alterando-se a viscosidade do fluido de trabalho pela aplicação de um campo magnético também controlável. O material capaz de gerar essa resposta ao campo aplicado é denominado Fluido Magneto Reológico – (MR) [1]. Para um fluido MR, a resistência ao cisalhamento pode ser controlada de forma a aumentar ou diminuir com a intensidade do campo magnético aplicado.

O objetivo deste trabalho foi dimensionar um pistão magneto reológico a partir das propriedades, medidas experimentalmente, de um fluido magneto reológico, utilizando a análise numérica para encontrar as dimensões ótimas do dispositivo evitando superdimensionamento e desperdício de material, fatores cruciais para o desenvolvimento de novos projetos.

2 | FLUIDO MAGNETO REOLÓGICO

Fluidos magneto reológicos são formados basicamente por três componentes principais: um líquido portador que pode ser um óleo hidrocarboneto (mais comum), composto por óleos minerais, sintéticos ou até mesmo a mistura dos dois, por silicones ou água dependendo

da aplicação; partículas micro magnéticas, inseridas no líquido portador formando uma dispersão coloidal [2] e aditivos para evitar sedimentação, prevenir aglomeração, melhorar a lubrificação, prevenir oxidação, modificar a viscosidade e inibir a corrosão [3]. Esse material tem o aspecto de um óleo cinza (sem aplicação de campo magnético) como pode ser observado na Fig. 1.



Fig. 1 - Aspecto do fluido magneto reológico sem aplicação de campo magnético e com aplicação de campo magnético, respectivamente (imagem adaptada de [4]).

2.1 FLUIDO MR - COMPORTAMENTO

Quando expostas a um campo magnético, as partículas magnéticas inseridas no fluido apresentam um momento de dipolo magnético paralelo à direção das linhas de fluxo de campo e assim, as partículas anteriormente desordenadas, alinham-se ao longo dessas linhas de fluxo formando uma estrutura em forma de correntes [5], como pode ser observado na Fig. 2.

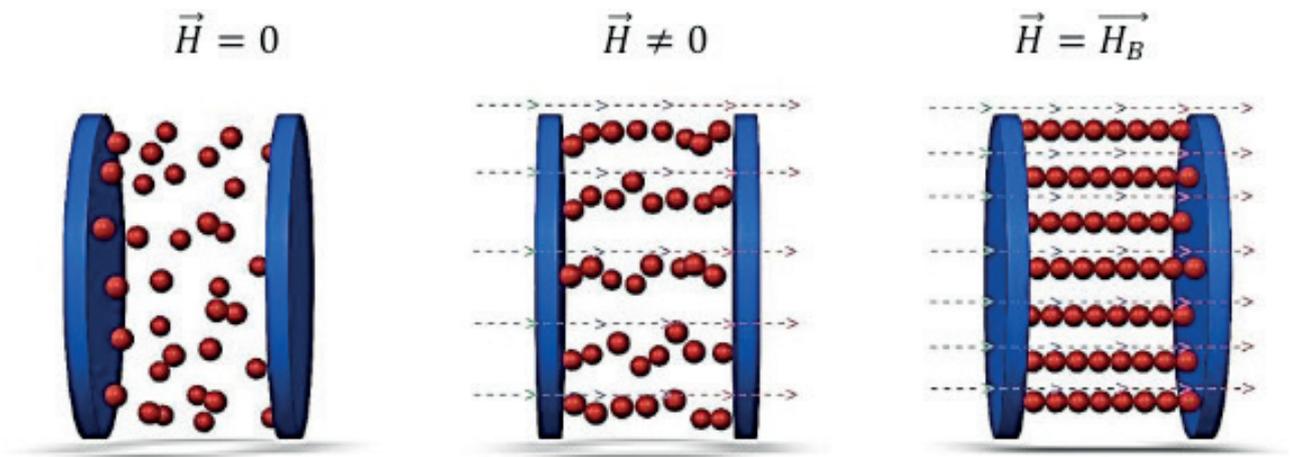


Fig. 2 - Alinhamento das partículas magnéticas presentes no fluido MR.

Para sair dessa configuração, faz-se necessária a aplicação de uma tensão de cisalhamento τ que seja suficientemente grande para fazer com que as correntes formadas pelas partículas deslizem umas sobre as outras. A resistência que essas correntes apresentam ao deslizamento é proporcional à magnitude do campo magnético aplicado, então quanto maior esse campo, maior a interação entre as partículas e maior a tensão de cisalhamento necessária para fazer escoar o material, agora em estado semissólido. A partir do momento em que o fluido começa a escoar, ele passa a exibir uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação por cisalhamento $\dot{\gamma}$ (1/s).

Esse comportamento apresentado pelo fluido MR pode ser descrito, de forma simplificada, pelo modelo visco-plástico de Bingham [6], dado por (1):

$$\tau = \tau_o(\vec{H}) + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

É representado graficamente por Fig. 3, em que $\tau_o(\vec{H})$ é a tensão de cisalhamento inicial induzida pelo campo magnético (Pa). μ_p é a viscosidade plástica (Pa.s), definida como a inclinação da linha gerada a partir da medição da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento do fluido $\dot{\gamma}$.

Nota-se que na ausência de campo magnético, $\vec{H} = 0$, o material se comporta como um fluido newtoniano.

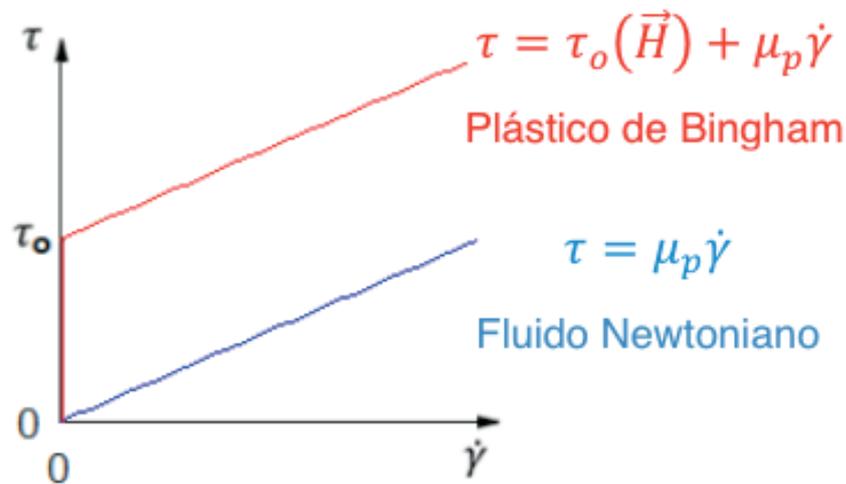


Fig. 3 - Modelo visco-plástico de Bingham.

2.2 FLUIDO MR – MODO DE OPERAÇÃO

O fluido magneto reológico apresenta três modos distintos de operação, sendo estes o modo válvula, modo de cisalhamento e modo de esmagamento [7]. Sendo o modo válvula o mais popular modo de operação e o modo aplicado na operação do pistão MR.

Ainda segundo [7], neste modo os polos magnéticos são fixos e funcionam como válvulas e então o fluido MR é pressurizado de maneira que flua entre esses dois polos. Expondo o fluido ao campo magnético, o alinhamento das partículas criando uma resistência ao fluxo do fluido o que leva a conclusão de que a vazão do material é função da intensidade do campo magnético aplicado. A Fig. 4 representa o modo de válvula.

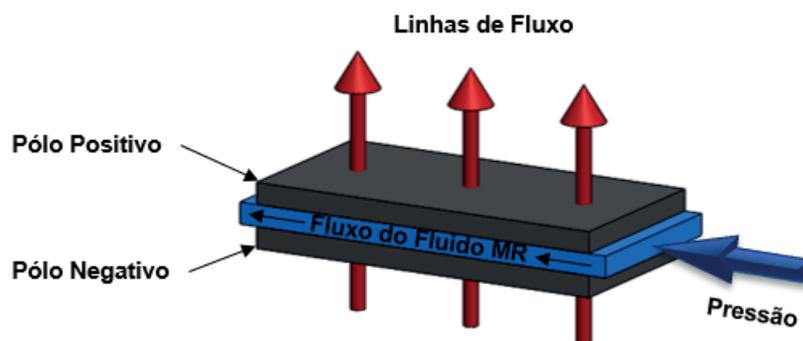


Fig. 4 – Representação do modo de válvula.

2.3 FLUIDO MR – CARACTERIZAÇÃO

Para caracterização dos fluidos magneto reológicos se faz necessária a utilização de equipamentos capazes de obter suas propriedades reológicas em função do campo magnético aplicado, tais como: Tensão de Cisalhamento Inicial e a Viscosidade Plástica.

Visando tal objetivo, neste estudo, foi utilizado um reômetro de placas paralelas, o Reômetro MCR[®] da empresa Anton Paar[®], com Dispositivo MRD[®] acoplado. Tal

equipamento permite obter com maior confiabilidade a resposta que a amostra de fluido analisada apresenta em relação à intensidade do campo magnético aplicado. Este equipamento é composto basicamente por cinco partes principais: uma placa estática na qual é possível depositar a amostra de fluido MR a ser analisada, uma placa móvel acoplada a servo motores (os quais fornecerão torque a esta placa permitindo a sua rotação e consequente cisalhamento do fluido e posicionamento da placa móvel sobre o filme de amostra de acordo com sua altura), bobinas eletromagnéticas capazes de magnetizar o fluido de acordo com o setup desejado, um sensor de carga de compressão, o qual faz a leitura do torque que foi necessário para conseguir girar a placa móvel fazendo o fluido cisalhar e um sistema de aquisição de dados para registro dos valores obtidos. A Fig. 5 mostra de forma esquemática a estrutura desse reômetro.

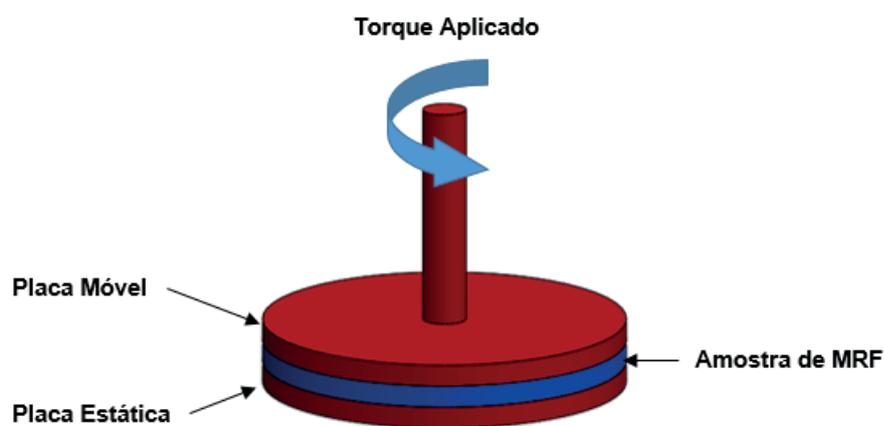


Fig. 5 – Representação simplificada do reômetro de placas paralelas.

Uma sonda de efeito hall também torna-se necessária para medir o fluxo de campo magnético aplicado à amostra.

Para esta análise, foi utilizado um fluido MR comercial da empresa Lord Corporation[®], o MRF 122EG[®].

3 | PISTÃO MAGNETOREOLÓGICO

Uma interessante aplicação dos Fluidos MR está associada ao seu emprego em dispositivos amortecedores os quais têm o objetivo de estabilizar a vibração provocada sobre eles pelo meio. Dessa forma, em conjunto a sistemas de controle que sejam capazes de decodificar uma excitação mecânica e gerar um campo magnético (por meio de impulso elétrico) proporcional a esta excitação, os fluidos MR (localizados no interior das câmaras dos amortecedores) podem ter sua viscosidade alterada proporcionalmente ao estímulo gerado e a vibração sentida pode, então, ser estabilizada.

Esses amortecedores MR são constituídos basicamente por um cilindro principal contendo um pistão, um circuito eletromagnético (bobinas), um acumulador (para alívio de sobrepressão) e o fluido MR, como pode ser observado em Fig.6.

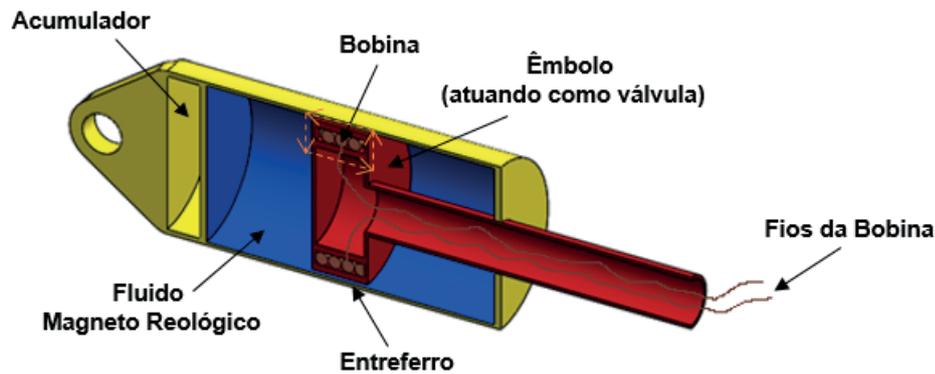


Fig.6 – Representação simplificada de um amortecedor magneto reológico.

Neste caso, devido a forma como a bobina é instalada no êmbolo do pistão, ela cria um campo magnético ao seu redor, proporcional à intensidade do pulso elétrico fornecido, magnetizando o fluido que se encontra nas suas proximidades. Dessa maneira, quando o êmbolo se movimenta, o fluido é pressionado e passa de uma câmara para outra por meio do entreferro (espaço entre o êmbolo e a parte interna do cilindro). Quanto maior for o campo magnético, maior será a viscosidade do fluido MR e maior será a dificuldade do pistão em se movimentar cisalhando esse fluido e dessa forma o sistema consegue absorver de maneira mais efetiva, e proporcional, a vibração imposta sobre ele, quando comparado a um sistema convencional.

Com base nessa configuração, um pistão magneto reológico foi desenvolvido com o intuito de gerar resistência ao movimento de um objeto qualquer preso a sua haste. Os tópicos que seguem revelam a metodologia utilizada para o desenvolvimento de tal dispositivo.

3.1 PISTÃO MR - CONFIGURAÇÃO

O software de desenho CAD 3D – Solidworks[®] foi utilizado para o desenvolvimento do design do mecanismo, tornando possível encontrar a melhor configuração para as necessidades de projeto. Este é representado pela Fig. 7 e conta com o cilindro principal, um êmbolo com encaixe para as bobinas, uma haste com acessório que possibilite prendê-la ao objeto que se deseja controlar o movimento, uma mola de compressão que permite o retorno da haste para a posição inicial e o fluido magneto reológico.

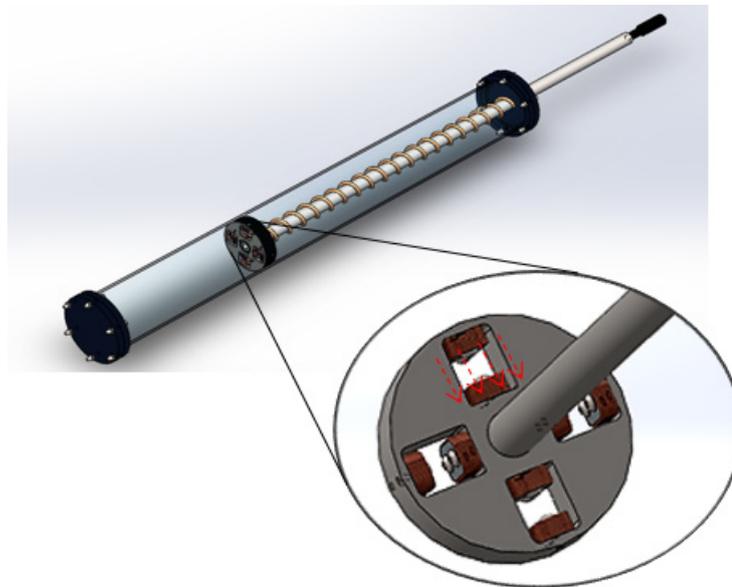


Fig. 7 - Pistão MR com retorno por mola.

As dimensões e material selecionados para o êmbolo estão de acordo com a Tabela 1.

Propriedade	Símbolo	Valor
Espessura	e	0,02m
Densidade do material (aço)	ρ	7900kg/m ³

Tabela 1 – Características do êmbolo.

O funcionamento desse amortecedor se dá pelo movimento do êmbolo dentro do cilindro, onde o fluido magneto reológico flui através dos orifícios presentes nesse êmbolo, os quais possuem bobinas eletromagnéticas acopladas, operando diferentemente dos amortecedores convencionais, em que o fluido escoar através do entreferro. Como o campo magnético gerado é perpendicular à linha de atuação do êmbolo do pistão (válvula), uma região de ativação é criada e as partículas alinhadas criam uma barreira à passagem do fluido, resultando na variação da força necessária para movimentar o mecanismo.

A vantagem desse modelo, quando comparado ao modelo mostrado em Fig. 6 é que devido a configuração das bobinas, as correntes formadas pelas partículas magnéticas estão sempre perpendiculares ao movimento do êmbolo, fato que torna a resistência ao movimento mais acentuada.

Com base no modelo do comportamento reológico do fluido MR (Plástico de Bingham), um modelo mecânico idealizado proposto por [8] foi criado e chamado de Modelo de Bingham. Esse modelo consiste de um elemento de atrito Coulomb colocado em paralelo com o amortecedor viscoso, como mostrado na Fig. 8.

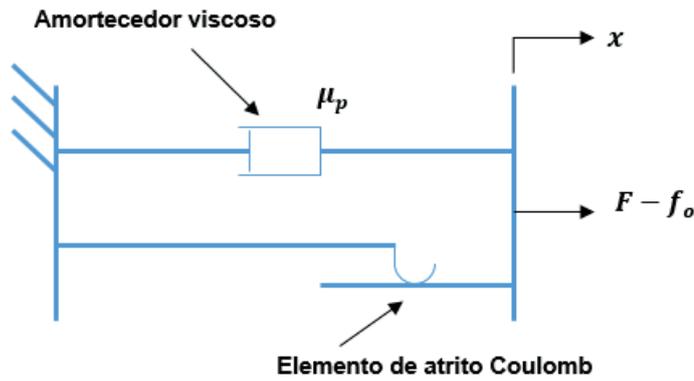


Fig. 8 - Modelo de Bingham.

De acordo com o modelo, para velocidades do pistão diferente de zero, a força $F - f_0$ (N) gerada pelo mecanismo é dada por (2):

$$F = f_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + \mu_p \dot{x} + f_0 \quad (2)$$

Em que f_c é a força relacionada à tensão de escoamento do fluido (N), dada por (3):

$$f_c = \tau_o(\vec{H}) \cdot A \quad (3)$$

Sendo A a área de seção transversal útil do êmbolo.

sgn é a função sinal, μ_p é a constante de amortecimento plástico (Pa.s), \dot{x} é a velocidade relativa das extremidades do amortecedor (m/s), f_0 é a força incluída na equação devido ao acumulador presente nos amortecedores (N).

Para o caso do pistão aqui modelado em que não há a presença de um acumulador, essa força - f_0 foi retirada da Equação (2) e substituída pela força elástica da mola de compressão.

Com base no equacionamento apresentado e tendo conhecimento do modo de operação tanto do fluido como do dispositivo, o mecanismo foi dimensionado para apresentar a melhor resposta aos estímulos gerados com maior economia possível de material.

3.2 PISTÃO MR – DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento do dispositivo foi realizado um balanço de forças de acordo com o diagrama representado em Fig. 9.

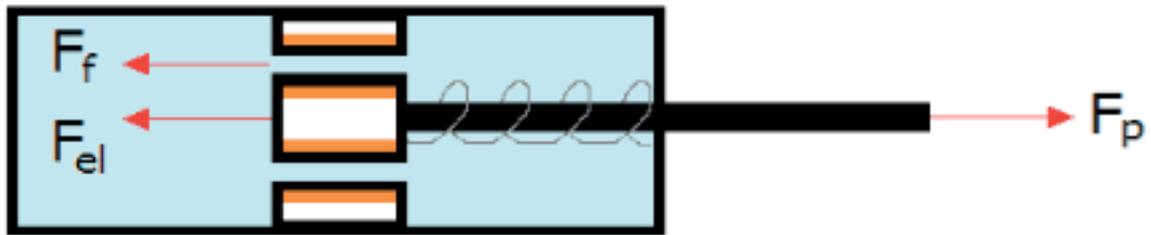


Fig. 9 - Balanço de forças do dispositivo.

Tem-se, assim, que para o fluido magnetizado a força na puxada F - (N) é dada por (4):

$$F = f_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + \mu_p \dot{x} + F_{el} \quad (4)$$

Em que F_{el} é a força elástica da mola de compressão (N), que de acordo com a Lei de Hooke, é dada por (5):

$$F_{el} = kx \quad (5)$$

Sendo k a constante elástica da mola (N/m), a distância percorrida pelo pistão (m).

No retorno do êmbolo à posição inicial, o sistema é desmagnetizado e o fluido opera como um fluido newtoniano. A volta se dá devido à força da mola, com baixa resistência devido ao fluido que apresenta suas partículas dispersas. As Equações (6) e (7) mostram o balanço das forças na volta:

$$F_{volta} = F_{el} - F_{f(off)} \quad (6)$$

$$F_{f(off)} = \tau_{off} \cdot A \quad (7)$$

Em que τ_{off} é a tensão de cisalhamento em *Off State* (Pa) (sem aplicação de campo magnético).

E lembrando que, pela segunda lei de Newton, a força é uma relação de massa e aceleração, assim, conhecendo as dimensões do êmbolo e sabendo o material do qual é fabricado (aço) e assim, a sua densidade, é possível manipular (6) de forma a obter (8):

$$m \cdot a = F_{el} - \tau_{off} \cdot A \quad (8)$$

Sendo que a massa do pistão m – (kg) é dada por (9):

$$m = V \cdot \rho \quad (9)$$

Em que V é o volume do pistão (m^3) (que pode ser determinado com a descoberta do raio ótimo do êmbolo).

Para que fosse possível encontrar as dimensões ótimas do sistema de acordo com as exigências de projeto, alguns dados de entrada foram estabelecidos como pode-se observar na Tabela 2.

Propriedade	Símbolo	Valor
Velocidade requerida para volta	v_volta	0,7m/s
Velocidade de puxada (ida)	v_ida	0,1725m/s
Força máxima requerida na puxada	Fp	2500N
Percurso do pistão	d	0,7m

Tabela 2 – Dados de entrada de projeto.

3.3 PISTÃO MR – ANÁLISE NUMÉRICA

A partir dos dados previamente estipulados como exigência de projeto para que o pistão pudesse operar de forma favorável, o raio ótimo do êmbolo – (m) pode ser determinado. Tendo conhecimento deste dado, a área de seção transversal do êmbolo, dada por (10), e o diâmetro interno da camisa do pistão puderam ser determinados de forma otimizada.

$$A = \pi R^2 \quad (10)$$

Lembrando que o dispositivo deveria ter tamanho tal que gerasse a força máxima requerida com o menor volume de recipiente (da camisa do pistão) possível, pois quanto menor fosse o êmbolo, menor seria o volume do sistema e assim, menos fluido magneto reológico seria empregado na operação, fator de extrema importância para economia de material aplicado em um projeto de engenharia.

Além disso, foi preciso garantir, antes da construção do protótipo, que este iria gerar a força máxima requerida quando o fluido estivesse na sua máxima magnetização e que quando a magnetização fosse nula o êmbolo teria tamanho tal que retornaria a sua posição inicial na velocidade exigida. Lembrando que quanto maior é o pistão, maior é a força que

dificulta a volta.

Como todas as equações para o dimensionamento do sistema envolvem o Raio ótimo do êmbolo foi preciso desenvolver um programa computacional iterativo que envolvesse todas as equações e as curvas dos dados analisados experimentalmente de forma a retornar um valor favorável para o raio e que suprisse, ao mesmo tempo, todas as necessidades de projeto, gerando a força necessária com menos gastos de material e tornando possível o conhecimento da quantidade de fluido MR a ser utilizada.

O código computacional foi desenvolvido no software MATLAB® e assim, os dados de projeto foram obtidos pela análise numérica, diminuindo as possibilidades de erro ao construir o mecanismo.

4 | 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que fosse possível variar o campo magnético, foi variada a corrente elétrica, obtendo dados conforme a Tabela 3.

Corrente Elétrica - A	Campo magnético - mT
0	0,7
2	345
3	511
4	658
5	768

Tabela 3 – Campo magnético em função da corrente elétrica

Os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação por cisalhamento foram obtidos experimentalmente, em duplicata, com auxílio do Reômetro MCR® Anton Paar®. Os dados foram inseridos no programa MATLAB® e uma programação foi realizada para gerar a média aritmética entre eles. Os gráficos que revelam a variação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação por cisalhamento, podem ser observadas nas Figuras 10-a a 10-d.

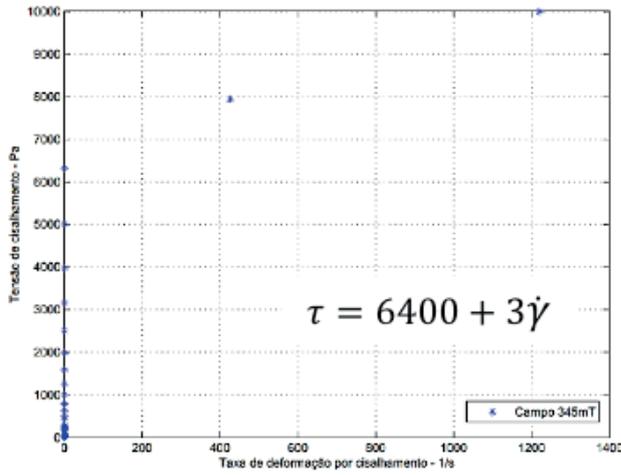


Fig. 10.a –Comportamento magneto reológico do fluido MRF 122-EG submetido a um campo magnético de 345mT.

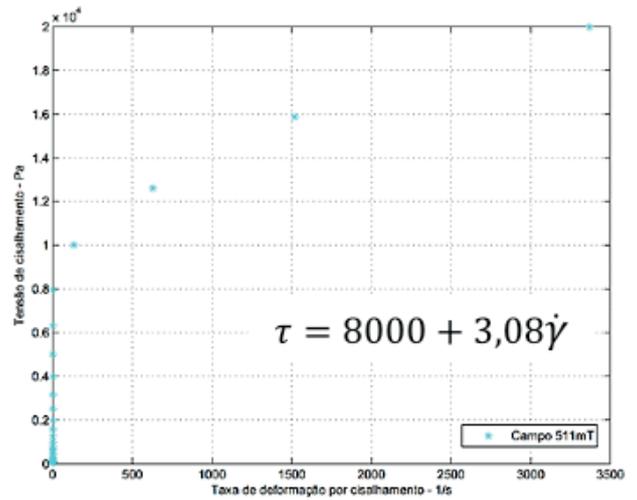


Fig. 10.b –Comportamento magneto reológico do fluido MRF 122-EG submetido a um campo magnético de 511 mT.

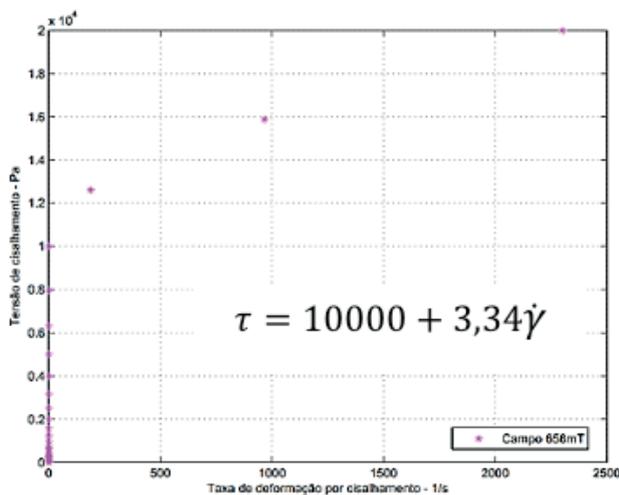


Fig. 10.c –Comportamento magneto reológico do fluido MRF 122-EG submetido a um campo magnético de 658mT.

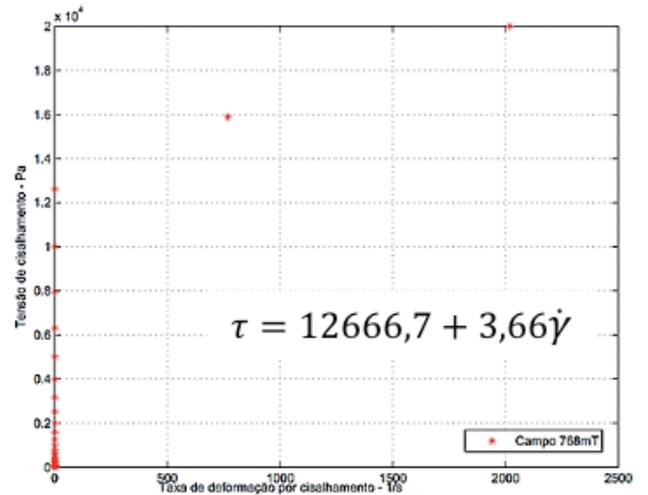


Fig. 10.d –Comportamento magneto reológico do fluido MRF 122-EG submetido a um campo magnético de 768 mT.

De acordo com os gráficos apresentados nas Fig.10 foi possível determinar a tensão de cisalhamento inicial do material e sua viscosidade plástica a diferentes campos magnéticos. Lembrando que a viscosidade plástica é dada pelo coeficiente angular dos segmentos de reta para cada campo aplicado, a partir de $\dot{\gamma} = 100/s$ (taxa de deformação por cisalhamento), ponto em que é possível notar que o fluido começa a escoar e a inclinação de sua curva estabiliza. Tais dados podem ser observados na Tabela 4.

Campo magnético aplicado – \vec{H} (mT)	Viscosidade Plástica – μ_p (Pa.s)	Tensão de cisalhamento inicial – τ_0 (Pa)
0,7	0,044	2
345	3,00	6400
511	3,08	8000
658	3,34	10000
768	3,66	12666,7

Tabela 4 – Propriedades reológicas do MRF 122-EG.

A partir dos dados obtidos, é possível notar como a viscosidade plástica do material se altera com a aplicação de campo magnético se tornando um material cada vez mais consistente.

Nota-se também que a tensão de cisalhamento cresce proporcionalmente com o aumento do campo magnético aplicado e praticamente linear com o aumento da taxa de deformação por cisalhamento, comportamento típico de um visco plástico, no qual os plásticos de Bingham estão inseridos.

Analisando os dados encontrados e “chutando” um valor inicial para o Raio ótimo do êmbolo que fosse suficientemente grande para que fosse possível acoplar a haste e as bobinas de forma a obter uma geometria que possibilitasse o correto funcionamento do mecanismo, e o suficientemente pequeno para evitar desperdício de material e gerar a força requisitada pelo projeto, obteve-se, por meio de análise numérica (iterações) que: com campo magnético de 511mT (3A) a força máxima requerida já seria obtida, com raio de tamanho favorável. Os resultados finais estão presentes na Tabela 5.

Propriedade	Símbolo	Valor
Força máxima	F	2472,2 N
Corrente máx. necessária	i	3 A
Campo magnético máx. necessário	\vec{H}	511 mT
Viscosidade plástica máx. necessária	μ_p	3,08 Pa.s
Tensão de cisalhamento máx.	τ_0	20 kPa
Raio ótimo do êmbolo	R	0,040 m
Peso do êmbolo	m	2,5 kg
Força elástica para retorno	F_{el}	28 N

Tabela 5 - Parâmetros finais de projeto.

Como a força elástica auxilia na resistência ao movimento na puxada e é elemento mecânico necessário para realizar o movimento de volta, tem-se que sua intensidade foi estipulada como sendo 28 N que é a força necessária para completar os 2500 N de força máxima na ida, requisito pré estipulado pelo projeto.

Para verificar se esses 28 N de força elástica seriam suficientes para fazer o mecanismo voltar à posição inicial em no máximo 1s ($v = 0,7\text{m/s}$ em um percurso de 0,7m), foi preciso inserir os dados encontrados na análise e apresentados na Tabela 5 nas Equações (8) e (10), sendo τ_{off} encontrado por meio dos dados apresentados na Fig.11.

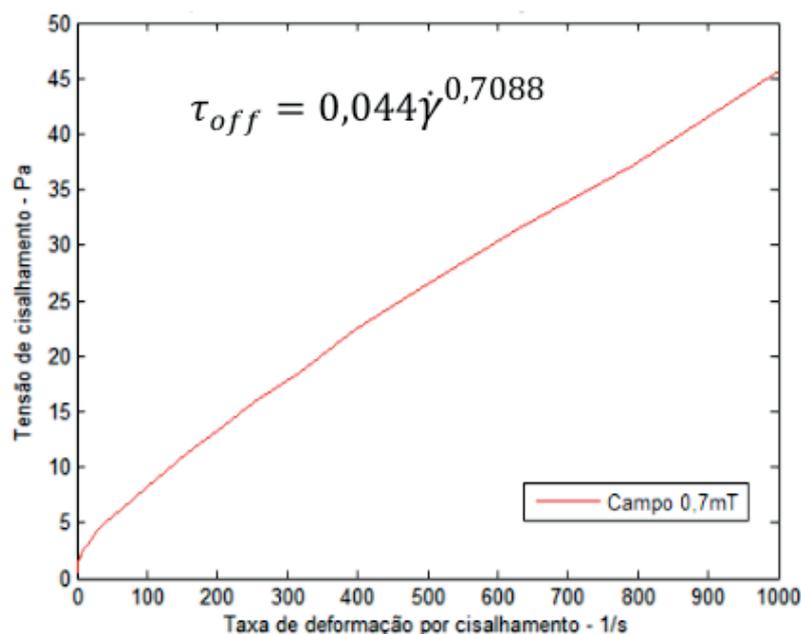


Fig. 11 – Tensão de cisalhamento x taxa de deformação por cisalhamento em *OFF State*.

Substituindo os valores de tensão de cisalhamento em *off state* (sem aplicação de campo magnético) em (8), obteve-se que a aceleração do mecanismo é cerca de 11m/s^2 o que garante a volta do êmbolo à posição inicial em menos de 1s, o que revela que $F_{el} = 28\text{N}$ é força suficiente para fazer o dispositivo operar conforme as necessidades do projeto.

5 | CONCLUSÃO

Esta pesquisa foi de fundamental importância para o dimensionamento dos componentes principais de um pistão magneto reológico, pois permitiu por meio da análise numérica a obtenção das dimensões ótimas do dispositivo estudado, o que na engenharia é peça essencial para o desenvolvimento de um projeto funcional e de custos reduzidos, capaz de gerar lucros sem gastos desnecessários e com dimensões que corroborem com a expectativa do projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Antônio José Faria Bombard da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI por toda colaboração, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá - UEM e a CAPES pelo subsídio a mim concedido.

REFERÊNCIAS

- [1] SPENCER, B. F. et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers. **Journal of engineering mechanics**, vol. 123, n. 3, p. 230-238, 1997.
- [2] SPAGGIARI, A. Properties and applications of Magnetorheological fluids. **Frattura ed Integrità Strutturale**, n. 23, p. 48, 2013.
- [3] BLACK, T.; CARLSON, J. D. **Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] SIDPARA, A. **Magnetorheological finishing: a perfect solution to nanofinishing requirements**. *Opt. Eng.* 53(9), 092002 (Mar 31, 2014).
- [5] KCIUK, M.; TURCZYN, R. Properties and application of magnetorheological fluids. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 18, n. 1-2, p. 127-130, 2006.
- SHAMES, Irving H. **Elastic and inelastic stress analysis**. CRC Press, 1997.
- [6] LIMA, A. S. de. **Identificação experimental de um Sistema magneto-reológico**. Rio de Janeiro: COPPE, 2011.
- [7] STANWAY, R. SPROSTON, J.L. and STEVENS, N.G. **Non-linear Identification of an Electrorheological Vibration Damper**. IFAC Identification and System Parameter Estimation, pp. 195–200, 1985.

SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID PARA UM SISTEMA MASSA-MOLA-AMORTECEDOR DE UM GRAU DE LIBERDADE

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 06/03/2020

Isabela Kimie Ota

Centro Universitário da Grande Dourados
(UNIGRAN)
Dourados – MS
<http://lattes.cnpq.br/5474557819840427>

Daniel Almeida Colombo

Centro Universitário da Grande Dourados
(UNIGRAN)
<http://lattes.cnpq.br/0172888278106060>

RESUMO: O presente trabalho se dedica a ajustar e aplicar um controlador PID para atenuação de vibração de um sistema massa-mola-amortecedor em ambiente computacional, através do software MatLab®. Ressalta-se que no projeto dos controladores PID foi utilizado a metodologia de Ziegler-Nichols baseada na margem de ganho para um controlador apenas proporcional. Os resultados obtidos demonstraram boa eficiência deste controlador sobre o efeito de diminuição da resposta dinâmica do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: controlador PID; massa-mola-amortecedor; vibração.

TUNE OF A PID CONTROLLER FOR A MASS-SPRING-DAMPER SYSTEM OF SINGLE DEGREE-OF-FREEDOM

ABSTRACT: The present work is dedicated to adjusting and applying a PID controller for vibration attenuation of a mass-spring-damper system in a computational environment, through Matlab® software. It is noteworthy that in the design of PID controllers the Ziegler-Nichols methodology based on the gain margin for a proportional controller was used. The results showed good efficiency of this controller on the effect of decreasing the dynamic response of the system.

KEYWORDS: PID controller; mass-spring-damper; vibration.

1 | INTRODUÇÃO

A importância apresentada pelo controlador PID pode ser observada na sua ampla utilização na indústria, sendo que mais da metade dos controladores industriais são controladores PID (OGATA; 2003). A utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade geral aos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e,

portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis. Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora em muitas situações eles podem não proporcionar um controle ótimo (DORF; 1995). Diante disto, o presente trabalho visa sintonizar os parâmetros do controlador PID para a atenuação de vibração de um sistema massa-mola-amortecedor de um GDL.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros de sintonia foram calculados a partir de relações analíticas ou algébricas entre o modelo da planta e uma função de transferência de malha fechada, cuja função de transferência é apresentada pela equação (1), determinou-se os valores das constantes de um controlador PID para que o sobressinal fosse inferior a 20% e o tempo de estabilização a 2 % fosse inferior a 6 (seis) segundos, para tal efeito foi utilizado a metodologia de Ziegler-Nichols.

$$H(s) = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (1)$$

A metodologia de Ziegler-Nichols é baseada na margem de ganho para um controlador apenas proporcional.

O ganho que leva o sistema massa-mola-amortecedor representado na Figura 1 a oscilar será chamado de G , e a frequência respectiva de ω_n . Pode-se encontrar este valor de vários modos, por exemplo através do diagrama do lugar das raízes ou pelos diagramas de Bode. No presente trabalho, utilizou-se o diagrama do lugar das raízes através do Matlab.

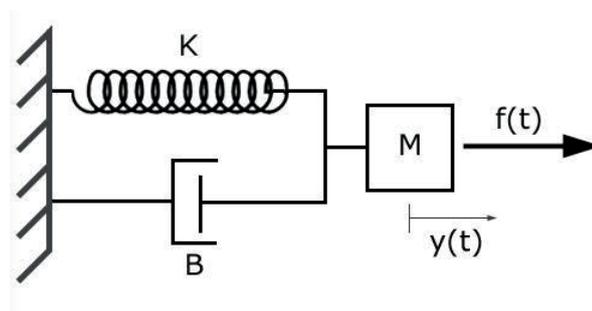


Figura 1. Sistema massa-mola-amortecedor.

O ponto selecionado evidentemente varia para cada aplicação do programa. No entanto, como o método é empírico, os valores podem ter uma pequena variação, o que não influi no resultado final. Assim, pode-se adotar as seguintes fórmulas para encontrar as constantes do controlador PID. No qual, k_p , k_i e k_d são os ganhos proporcional, integral e derivativo [1].

$$k_p = 0,6G$$

$$k_d = (k_p \pi) / (4 \omega_n)$$

$$k_i = (k_p \omega_n) / \pi$$

As Equações 2 e 3 apresentam as relações entre estes ganhos em função da frequência natural (ω_n) e do fator de amortecimento (ξ).

$$\frac{k_p + 1}{k_d} = \xi \omega_n = \frac{B}{2M \omega_n} \omega_n \quad (2)$$

$$\frac{k_i}{k_d} = \omega_n^2 \quad (3)$$

Os parâmetros do sistema massa-mola-amortecedor em estudo são apresentados na Tabela I.

Frequência natural (ω_n)	65,1610 [rad/s]
Massa (M)	1,5962 [kg]
Amortecimento (B)	8,0559 [Ns/m]
Rigidez (K)	6777.4 [N/m]

Tabela I- Parâmetros Físicos do sistema

Fonte: Adaptado de (COLOMBO; 2018)

A partir destes valores dos parâmetros, as simulações foram executadas com o auxílio do software Matlab/Simulink. A Planta que melhor representa o modelo simulado é apresentada pela Figura 2.

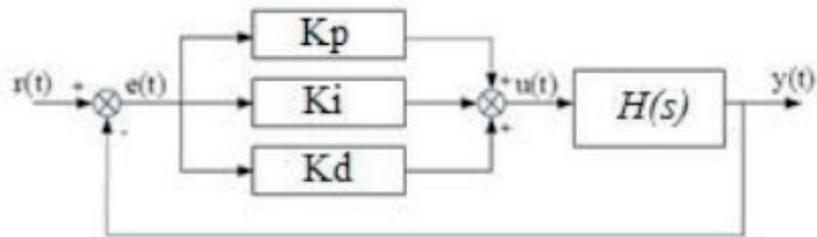


Figura 2. Modelo do Sistema.

3 | RESULTADO E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a resposta ao deslocamento com o controle ligado e desligado. O objetivo desta etapa é analisar o comportamento do controlador PID sintonizado, a partir de uma entrada impulsiva de 10N. O tempo de simulação utilizado foi de 2s.

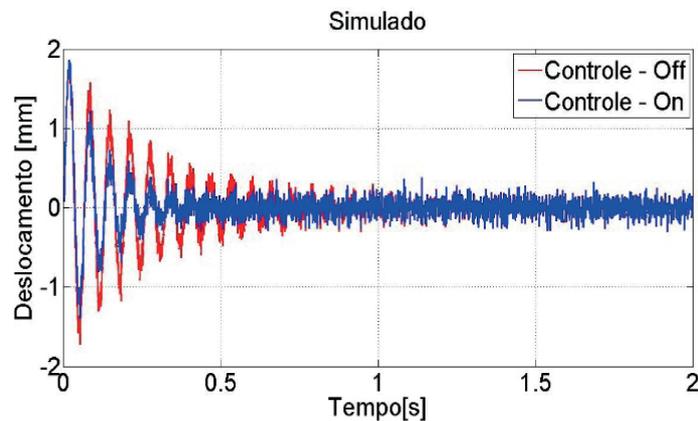


Figura 3. Resposta ao deslocamento.

Analisando os resultados apresentados pela Fig. 3 observa-se que o sistema foi controlado utilizando o controlador PID, o que pode ser comprovado pela redução na amplitude da resposta com Controle On. Observa-se também que o tempo de acomodação foi inferior a 0,5s.

A Figura 4 apresenta a Resposta em Frequência do sistema com o Controle On e Off.

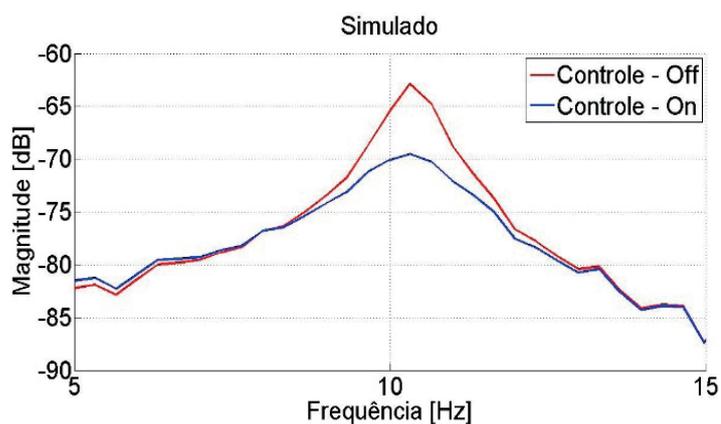


Figura 4. Função Resposta em Frequência.

Analisando o resultado apresentado pela FRF do gráfico da Fig. 4, nota-se que o controle reduziu a amplitude do modo de vibração do sistema de 1 GDL. A redução obtida foi de 6,5dB, e ainda nota-se que o controlador PID sintonizado não resultou em nenhum deslocamento da frequência natural.

4 | CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo sintonizar um controlador PID para a atenuação da vibração de um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade. Com este propósito, adotou-se um sistema massa-mola-amortecedor de 1 GDL para estudo, a partir dos parâmetros físicos deste, sintonizou-se um controlador PID. As análises foram executadas no âmbito numérico com o auxílio do software Matlab/Simulink.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o controlador PID sintonizado reduziu satisfatoriamente a resposta ao deslocamento do sistema bem como o nível da amplitude vibracional do mesmo.

REFERÊNCIAS

- D. A. Colombo, **Controle Neuro-Fuzzy Aplicado na Atenuação de Vibrações Utilizando Atuadores Eletromagnéticos**, Dissertação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2018.
- K. Ogata, **Engenharia de controle moderno**, pp. 1-2, 67-68, Editora Prentice Hall, São Paulo, 2003.
- R. C. Dorf et. al., **Modern Control System**, 7^a Edição, Addison-Wesley, New York, 1995.

AVALIAÇÃO DO USO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS COMO DISPOSITIVO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Data de aceite: 19/06/2020

Data de submissão: 06/03/2020

Marco Antonio Rodrigues de Brito

Universidade Federal de Pernambuco,
Departamento de Engenharia Mecânica

Recife – PE

<http://lattes.cnpq.br/2192954386106600>

Marcus Costa de Araújo

Universidade Federal de Pernambuco,
Departamento de Engenharia Mecânica

Recife – PE

<http://lattes.cnpq.br/4157405186898932>

RESUMO: Motores de combustão interna utilizados em veículos automotivos são conhecidos por terem uma eficiência particularmente baixa (comumente 25-30%). Entretanto alguns métodos são conhecidos por trazerem a oportunidade de aumentar tal eficiência, incluindo a recuperação de calor residual. Aqui, a modelagem termodinâmica de uma unidade de recuperação de calor foi desenvolvida para o sistema de exaustão de um motor de combustão interna automotivo bicomustível, com o objetivo de analisar o incremento na eficiência energética do motor. Os materiais semicondutores, utilizados nas células termoelétricas são o Yb₁₄MnSb₁₁ e Si₈₀Ge₂₀. A análise e modelagem foram

realizadas com o auxílio de programas de cálculo computacional. Cálculos para o caso mais simples, com trocadores de calor em cobre e com 45 aletas no duto de exaustão mostraram que, apesar da baixa eficiência (7,16% neste caso) apontada como principal desvantagem destes geradores, é possível obter uma fonte de energia elétrica de cerca de 1,8KW, mais alta do que outros estudos presentes na literatura. Esta alta potência se deve principalmente às altas temperaturas dos gases (1200K), já que a temperatura da fonte quente é o fator mais importante no desempenho de um gerador termoelétrico. A energia elétrica gerada poderia ser reaproveitada de diversas maneiras, como dispositivos elétricos no veículo ou sendo redirecionada para alimentar a bateria.

PALAVRAS-CHAVE: Gases de exaustão; Gerador termoelétrico; Motor de combustão interna; Recuperação de calor residual.

EVALUATION OF THE USE OF THERMOELECTRIC MODULES AS A MEANS FOR THERMAL ENERGY RECOVERY IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

ABSTRACT: Internal combustion engines used in most of the automobiles are known for having a predominantly low efficiency (usually 25-30%). However, some methods

are recognized for making it possible to increase such efficiency, including the waste heat recovery. Here, the thermodynamic modeling of a heat recovery unit was developed for the exhaust system of a car's bi-fuel internal combustion engine, for analysing the raise in the engine's energy efficiency. The semiconducting materials used in the thermoelectric cells were $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ and $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$. The analysis and modeling were obtained with the aid of computational calculation software. The calculations for the simplest case, with copper heat exchangers having 45 fins in the exhaust duct showed that despite the low efficiency (7.16% in this case) usually pointed as the main disadvantage of this generators. It is possible to obtain a power source of 1.8kW, higher than other studies present on the literature. This high power happens mainly because of the higher exhaust temperatures (1200K), as the temperature of the heat source are known to be the most important factor of the performance of a thermoelectric generator. The generated power could be used in many ways, including electric equipment in the car or being redirected to power the battery.

KEYWORDS: Exhaust gases; Thermoelectric generator; Internal combustion engine; Waste heat recovery.

1 | INTRODUÇÃO

Somos hoje completamente dependentes dos meios de transporte para viver, e a grande maioria deles é alimentada com combustíveis fósseis. Karvonen et al. (2016) afirma que “80 milhões de carros são vendidos por ano atualmente, enquanto 95% destes carros funcionam a base de diesel ou outros tipos de combustíveis fósseis”. Desta forma, somos também seriamente dependentes dos combustíveis fósseis e de seus derivados.

Isso levanta uma questão ambiental preocupante: os combustíveis fósseis não são renováveis e um consumo desenfreado pode levar a uma diminuição drástica e até uma possível extinção das reservas destes minerais. Ao mesmo tempo há a questão dos gases estufa. Combustíveis fósseis são inimigos das políticas de defesa ambiental por serem responsáveis por boa parte da emissão dos gases causadores do efeito estufa, além de outros gases tóxicos.

Os motores de combustão interna são conhecidos por terem rendimento relativamente baixo comparado a outros tipos de sistemas de geração de energia. Apenas cerca de 25% da energia liberada pela combustão é realmente utilizada para fins de mobilidade e acionamento elétrico de acessórios dos automóveis em que é empregado. A maior parte das perdas deste tipo de motor se dá através do sistema de exaustão – cerca de 40% (Yang, 2005) – como pode ser visto na Figura 1.

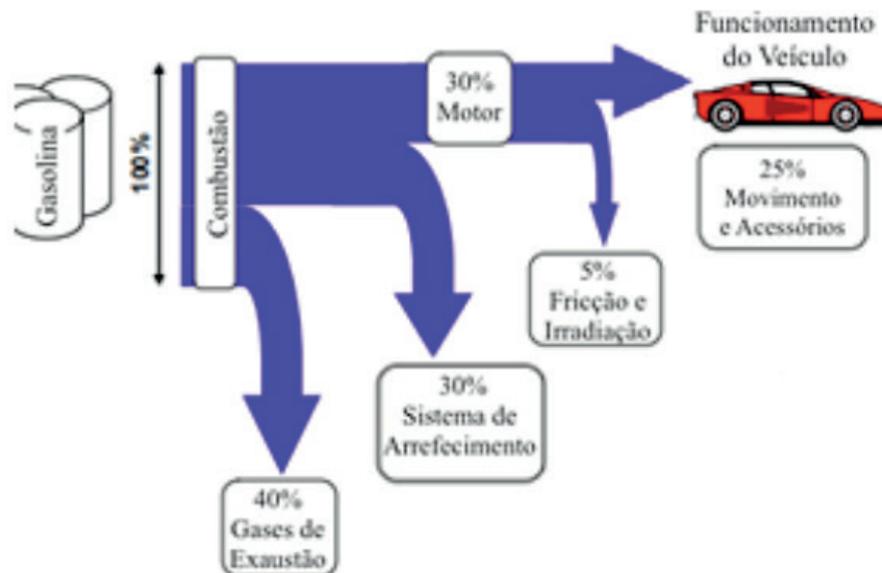


Figura 1 – Trajeto da energia em um veículo de motor de combustão interna

Fonte : (Yang, 2005).

Logo, é de suma importância que sejam desenvolvidas novas tecnologias que visem aumentar o rendimento térmico dos motores de combustão interna de automóveis, já que estes representam uma grande parcela do uso de energia da sociedade, e só no Brasil este valor representa 32,2% de todo o uso de energia no país (Empresa de Pesquisa Energética, EPE, 2016).

Um dos principais campos de pesquisa que tem este intuito é a recuperação de calor residual. Esta pode ser realizada em praticamente qualquer equipamento onde ocorre perda de energia em forma de calor e consiste em reaproveitar através de sistemas auxiliares, calor resultante de um processo químico ou de geração de energia que seria descartado para o meio-ambiente.

Um dos métodos de recuperação de calor mais promissores atualmente é o uso de geradores termoelétricos. Esta potencialidade se dá por serem de simples montagem e uso, e principalmente pelo potencial relativo à descoberta de materiais que permitam a confecção de geradores termoelétricos com eficiências cada vez maiores.

Este trabalho tem então como objetivos a modelagem e a análise de um sistema de recuperação de calor residual de exaustão para uso em motores de combustão interna veiculares utilizando geradores termoelétricos.

2 | RECUPERAÇÃO DE CALOR VEICULAR

A grande quantidade de energia expelida em forma de calor, na corrente de gases exauridos pelos motores de combustão, poderia ser potencialmente recuperada para incrementar a potência mecânica do motor (Saidur et al., 2012). Entre outros usos, haveria possibilidade de gerar energia elétrica auxiliar que alimentaria componentes elétricos do

automóvel.

Com um maior aproveitamento energético, obter-se-ia uma série de benefícios em relação aos motores de combustão interna. Como consequência do aumento de rendimento térmico haveria necessidade de uma quantidade menor de combustível, levando a uma diminuição de consumo e logo, da dependência de combustíveis fósseis. Consequentemente, haveria uma menor quantidade de emissões de gases poluentes (Saidur et al., 2012). Seria possível ainda ter motores menores para gerar a mesma potência, levando a uma grande redução de custos de produção.

A recuperação de calor no motor de combustão interna veicular pode ser feita em dois pontos, aproveitando calor dos gases de exaustão ou do fluido de arrefecimento do motor. O sistema de exaustão, no entanto, recebe mais atenção dos estudiosos por lidar com temperaturas mais elevadas que facilitam a troca de calor. Logo, aqui trataremos apenas deste último.

Recentemente grande atenção tem sido dada ao ramo de recuperação de calor veicular, levando a pesquisas significantes sobre várias tecnologias para este fim. Uma consideração importante dos métodos de recuperação para uso veicular é que estes devem atender a requisitos específicos para poderem ser viáveis na indústria automotiva. Eles devem ser compactos – pois não devem interferir na aerodinâmica do carro – e não podem ser muito pesados – para que os ganhos de potência não sejam sacrificados para locomover o próprio sistema de recuperação. Além disto, devem ser economicamente plausíveis de modo que a redução de custos seja maior do que os gastos com implementação. Deve-se levar em conta ainda a inconstância dos parâmetros relacionados, já que a demanda energética no motor e consequentemente o calor disponível variam com o tempo. Isso pode fazer com que o sistema saia de sua faixa de operação. É necessário então que ele seja monitorado e controlado, ou tenha uma faixa de operação bastante larga.

Das técnicas de recuperação de calor aplicáveis a motores de combustão interna veicular, as principais podem ser consideradas as seguintes: recuperação por ciclo Rankine, por geradores termoelétricos e por sistemas turbocompressores, este último já estando presente na indústria automotiva há muitas décadas (Karvonen et al., 2016).

3 | GERADORES TERMOELÉTRICOS

O Gerador Termoelétrico está entre as tecnologias mais promissoras para a recuperação de calor. Um dispositivo de conversão termoelétrica permite transformar diretamente um diferencial de temperatura em energia elétrica. As células são compostas por um termopar, que quando tem suas diferentes pontas expostas a temperaturas distintas, é capaz de gerar uma diferença de potencial elétrico e, logo, uma corrente elétrica (Saidur et al., 2012). O esquema de uma célula de conversão termoelétrica pode ser visto em detalhe na Figura 2.

A conversão de energia térmica para energia elétrica ocorre devido ao chamado efeito Seebeck – descoberto em 1821 pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck – e é uma propriedade intrínseca de um material ou termopar. A energia gerada por este efeito, no

entanto, depende das propriedades dos materiais e para a maioria dos materiais é pequena ao ponto de ser irrelevante. Segundo o efeito Seebeck quando materiais condutores diferentes são unidos e suas junções expostas a diferentes temperaturas, uma diferença de potencial elétrico é gerada entre os materiais, e conseqüentemente uma corrente elétrica se o circuito for fechado. Isto é causado pois quando as juntas são aquecidas os elétrons mudam de níveis de energia de maneira diferente em cada material, causando a diferença de potencial.

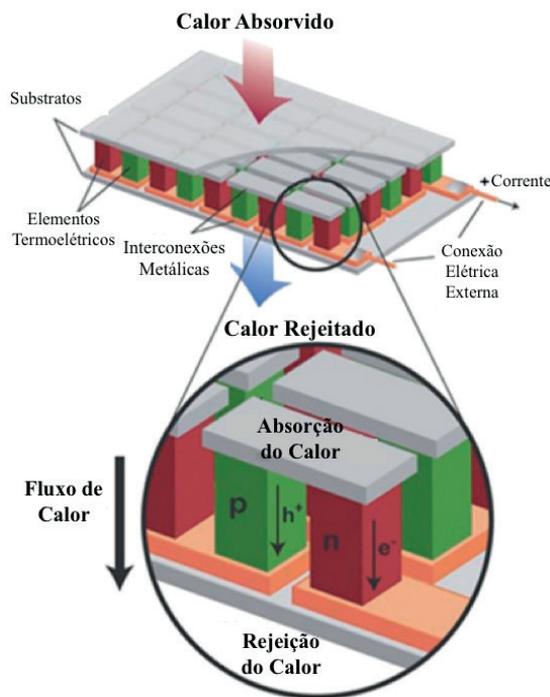


Figura 2 – Esquema básico de um gerador termoelétrico

Fonte: (Saidur et al., 2012).

O rendimento térmico de uma célula termoelétrica está diretamente ligado a uma propriedade adimensional dos materiais chamada figura de mérito. Esta é dada por:

$$ZT = S^2T/\kappa\rho \quad (1)$$

Onde S representa o coeficiente termodinâmico de Seebeck, T a temperatura absoluta, κ a condutividade térmica e ρ é a resistividade elétrica do material. A eficiência de um módulo construído com diferentes materiais, no entanto depende das figuras de mérito de ambos os materiais e normalmente é relacionada com a figura de mérito modificada, que é definida por Singh & Verma (2013) como:

$$Z\bar{T} = \frac{(S_{pn})^2 \bar{T}}{[(\kappa_n \rho_n)^{1/2} + (\kappa_p \rho_p)^{1/2}]^2} \quad (2)$$

Em que os índices subscritos p e n designam as propriedades para os materiais semicondutores tipo p e tipo n respectivamente, $S_{pn} = S_p - S_n$ e \bar{T} representa a temperatura média entre os lados quente e frio do dispositivo.

Por muito tempo as figuras de mérito dos materiais conhecidos estiveram abaixo de 1, além não serem apropriados para temperaturas muito altas, fazendo com que estes geradores fossem utilizados apenas em aplicações aeroespaciais (em que a baixa eficiência é compensada pela necessidade de sistemas compactos e de simples operação). Porém, na última década vários estudos foram feitos desenvolvendo ligas de materiais semicondutores com acréscimo significativo nesta propriedade, tornando esta tecnologia pertinente para outras aplicações, o que inclui a recuperação de calor residual. Não apenas os materiais recentes têm desempenho mais alto, como várias ligas foram desenvolvidas para cobrir uma maior faixa de temperatura de operação.

Apesar de ainda terem rendimento térmico baixo (o que se torna a principal desvantagem deste método de recuperação de calor), as células termoelétricas representam uma das principais alternativas para recuperação de calor veicular. Garantindo a conversão de energia térmica de má qualidade em energia elétrica de boa qualidade de maneira simples e confiável (Saidur et al., 2012). Estes dispositivos poderiam ser utilizados para substituir o alternador – que recebe energia da rotação do motor – no carregamento da bateria e, por conseguinte na alimentação dos dispositivos eletroeletrônicos presentes nos automóveis. Logo, com seu uso haveria um benefício duplo no ganho de energia.

Entre as vantagens do uso destes aparelhos para fins veiculares pode-se apontar o fato de serem dispositivos compactos, de alta confiabilidade, de operação silenciosa e que não contém nenhuma parte mecânica complexa ou móvel como os outros métodos de recuperação de calor. Além disto, nenhuma modificação precisa ser realizada no motor pois são necessárias apenas pequenas alterações no sistema de exaustão, diminuindo consideravelmente o custo de implantação desta tecnologia em escala industrial.

3.1 Modelagem matemática dos geradores termoelétricos

A maioria dos modelos matemáticos existentes para geradores termoelétricos foram derivados da modelagem apresentada por Angrist (1976) que foi modificada à medida que autores da literatura a revisitavam, desejando uma abordagem mais aprofundada sobre algum aspecto de seu funcionamento (Hendricks et al., 2016). Nele, a célula termoelétrica é modelada como uma sequência de resistências térmicas existentes entre uma fonte quente e uma fonte fria. Aqui, decidiu-se utilizar a variante apresentada em LeBlanc et al. (2014). Um diagrama do modelo está representado na Figura 3. Segundo este modelo os princípios considerados no funcionamento de uma célula termoelétrica incluem o efeito Seebeck, o

efeito de condução e o efeito Joule.

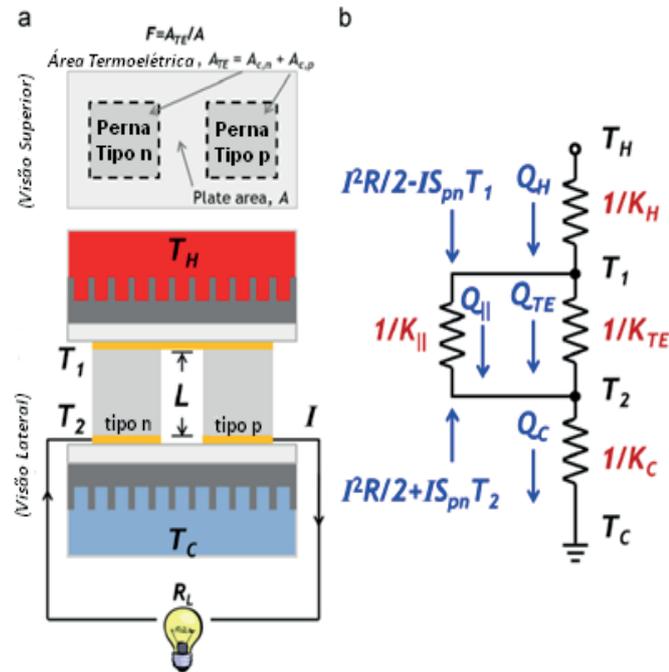


Figura 3 – (a) Esquema de um módulo termoeétrico. (b) Modelo termodinâmico equivalente com resistências térmicas.

Fonte: LeBlanc et al. (2014).

Através disto é possível calcular as taxas de fornecimento de calor (\dot{Q}_h) e a taxa de remoção de calor (\dot{Q}_c) do sistema. Assim, com um balanço de energia (nos pontos T_1 e T_2) obtêm-se as seguintes equações:

$$\dot{Q}_h = (K_{||} + K_{TE})(T_1 - T_2) + S_{pn}IT_1 - \frac{1}{2}I^2R \quad (3)$$

$$\dot{Q}_c = (K_{||} + K_{TE})(T_1 - T_2) + S_{pn}IT_2 + \frac{1}{2}I^2R \quad (4)$$

Neste modelo K_H representa a condutância térmica da interface com a fonte quente e K_C representa a condutância térmica da interface com a fonte fria. Estas levam em conta a condutância de todos os componentes entre os dois pontos do sistema (incluindo convecção na fonte, condução através do trocador, contato entre materiais e condução através da cerâmica utilizada como isolante elétrico na célula). K_{TE} representa a condutância dos materiais do termopar e $K_{||}$ aparece para levar em conta a perda de calor no interior da célula para o meio. Os valores de K_{TE} e R (resistência interna do sistema) são dados respectivamente por:

$$K_{TE} = \frac{k_p A_{c,p}}{L_p} + \frac{k_n A_{c,n}}{L_n} \quad (5)$$

$$R = \frac{L_p}{k_p A_{c,p}} + \frac{L_n}{k_n A_{c,n}} \quad (6)$$

Sabendo ainda que \dot{Q}_h e \dot{Q}_c podem ser dados por:

$$\dot{Q}_h = K_H(T_H - T_1) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_c = K_C(T_2 - T_C) \quad (8)$$

E utilizando a seguinte expressão para corrente I:

$$I = \frac{S_{pn}(T_1 - T_2)}{(m + 1)R} \quad (9)$$

Onde $m = R_L/R$ e R_L é a resistência da carga elétrica a ser conectada ao sistema. Substituindo (7) e (8) em (3) e (4), com alguma manipulação chega-se a:

$$K_H(T_H - T_1) - (K_{||} + K_{TE})(T_1 - T_2) - \frac{S_{pn}^2(T_1 - T_2)T_1}{(m + 1)R} + \frac{S_{pn}^2(T_1 - T_2)^2}{(m + 1)^2R} = 0 \quad (10)$$

$$m \frac{S_{pn}^2(T_1 - T_2)^2}{(m + 1)^2R} - K_H(T_H - T_1) + K_C(T_2 - T_C) = 0 \quad (11)$$

Que podem ser resolvidas numericamente para encontrar as temperaturas das junções T_1 e T_2 . Encontrados estes valores, todas as outras equações apresentadas podem ser resolvidas para encontrar Q_H , Q_C , I além de outras variáveis, como a potência gerada pelo sistema, dada por:

$$P_{gen} = m \frac{S_{pn}^2(T_1 - T_2)^2}{(m + 1)^2R} \quad (12)$$

E a tensão elétrica gerada entre os terminais:

$$V = S_{pn}(T_1 - T_2) \quad (13)$$

Outro termo importante é a figura de mérito do módulo, uma medida da capacidade do módulo em converter energia térmica em elétrica, definida como:

$$ZT_i \equiv \frac{S_{pn}^2 T_i}{K_T R} \quad (14)$$

Onde i é o coeficiente que representa a temperatura em que a propriedade é avaliada. E por fim, a eficiência do módulo pode ser calculada:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \left(\frac{mZT_1}{ZT_m + mZT_1 + (m+1)^2} \right) \quad (15)$$

4 | METODOLOGIA

Este estudo visa propor um modelo de unidade recuperadora de calor para motores de combustão interna baseado em geradores termoelétricos e analisar seu desempenho. Para tal, as seguintes etapas foram necessárias:

4.1 Seleção da geometria do sistema

Determinado o modelo matemático dos módulos termoelétricos iniciou-se o desenvolvimento da unidade recuperadora de calor. Uma geometria para o protótipo foi selecionada. O exemplo escolhido como base foi o sugerido por Stabler (2009) e pode ser visto na Figura 4. Este modelo básico utiliza uma geometria de seção transversal retangular e o fluido de arrefecimento do motor como fonte fria. Ele contém um trocador aletado no lado quente que permite um coeficiente geral de troca de calor satisfatório em um sistema compacto adequado para implementação em veículos de passeio.

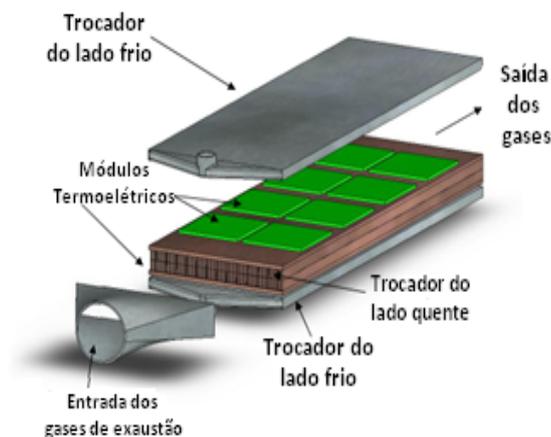


Figura 4 – Esboço da unidade em análise.

Fonte: (Stabler, 2009).

Os parâmetros geométricos utilizados aqui foram adaptados de Baker et al. (2012), que modelou um sistema semelhante. Estes podem ser vistos na Tabela 1.

Dados Geométricos do Sistema		
Trocador	Fonte Quente	Fonte Fria
Altura (cm)	3,50	1,00
Largura (cm)	30,00	30,00
Comprimento (m)	1,00	1,00
Espessura (mm)	6,35	6,35

Tabela 1 - Parâmetros dos trocadores de calor

O número de aletas escolhido foi de 45 com uma espessura de 2,5 mm.

4.2 Condições de contorno

Para a temperatura de entrada do fluido quente foram empregados dados de um motor em desenvolvimento, cedidos por uma montadora de veículos local. O motor é um bicomustível a ciclo Otto (Etanol e Gasolina). Foram tomados para análise os valores médios (relativos à rotação média do motor), tais dados podem ser vistos na Tabela 2. A posição selecionada no sistema de exaustão para a unidade recuperadora de calor foi imediatamente após a saída da turbina do sistema turbocompressor, já que os dados dos gases de exaustão cedidos pela montadora de automóveis supracitada são relativos a esta posição. Para análise inicial os gases foram considerados como ar (gás ideal). Os dados relativos a vazão e pressão do líquido de arrefecimento correspondente não foram cedidos e tiveram valores aproximados calculados com auxílio de Brace et al. (2001) e Power Solutions (2013) para um motor de 1.6L de cilindrada e cerca de 85kW de potência. Através da vazão obtida estimou-se um aumento percentual do sistema de arrefecimento, do tamanho do radiador e do volume total de fluido para comportar também a troca de calor na fonte fria do sistema de recuperação.

Condições de Contorno (médias)	
Rotação do Motor (RPM)	3500
Fluido de Arrefecimento no Motor (L/s)	2,8
Aumento no Sistema de Arrefecimento	14%
Parâmetros dos Gases de Exaustão	
Vazão (kg/s)	0,09
Temperatura de Entrada (K)	1192,75
Líquido de Arrefecimento	
Vazão (L/s)	0,4
Temperatura de Entrada (K)	353,15

Tabela 2 - Dados de entrada do software

É importante perceber que o sistema descrito e modelado com as equações presentes em 3.1 levam em conta apenas a metade simétrica da unidade de recuperação de calor aqui proposta. Logo, os valores nas equações tiveram de ser adequadamente corrigidos para avaliar as duas partes do sistema. A vazão mostrada na Tabela 2 para o líquido de arrefecimento percorrendo o sistema é dividida igualmente para a parte superior e a inferior de líquido frio como pode ser visto na Figura 4.

Em seguida, foi selecionado o material dos trocadores. Decidiu-se por utilizar cobre devido à sua alta condutividade térmica, baixo custo e alto ponto de fusão, necessário já que o sistema irá atuar em altas temperaturas (na faixa de 1100 a 1200 K).

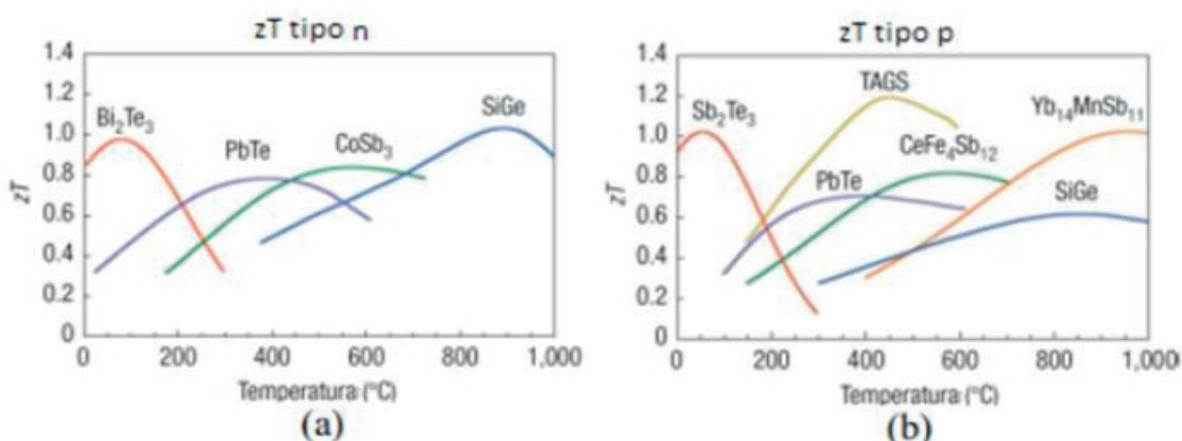


Figura 5 – Figuras de mérito de semicondutores conhecidos

Fonte: Nochetto et al. (2013).

Por fim foi feita a seleção dos materiais termoelétricos a serem empregados nas células e suas propriedades geométricas. Os materiais foram escolhidos com o intuito de obter a máxima figura de mérito na faixa de temperatura em que o sistema atuará, entretanto, utilizando materiais mais comumente encontrados no mercado para garantir assim uma maior viabilidade financeira ao projeto. Utilizando dados disponíveis em Nochetto et al. (2013), visíveis na Figura 5, optou-se por $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ (Antimoneto de Itérbio Manganês) para o semicondutor tipo 'p' e $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$ (uma liga de Silício-Germânio nanoprocessada) para o

semicondutor tipo 'n'. As propriedades para estes materiais foram retiradas de Zhang & Zhao (2015) e Kallel et al. (2013) respectivamente.

Os parâmetros geométricos relativos a área de contato e altura dos semicondutores foram baseados nos trabalhos de Liang et al. (2014) e Liu et al. (2015) e podem ser vistos na Tabela 3. A superfície externa dos trocadores foi preenchida com os módulos referidos totalizando 200 pares termoelétricos na parte superior e 200 na inferior do duto de exaustão representado na Figura 4. Para fins de comparação, uma célula como as vendidas pela Hi-Z (Empresa americana que comercializa geradores termoelétricos) contém de 40 a 120 módulos pn (termopares). Estes módulos são ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, configurando assim o sistema final. Quando várias células (compostas por vários termopares) são utilizadas para compor um sistema maior elas são também ligadas eletricamente em série e termicamente em paralelo. Logo, as propriedades dos módulos termoelétricos S , K_{TE} , K_{II} e R devem ser multiplicados pelo número de módulos n .

Propriedades dos Materiais Termoelétricos a 1200 K		
Semicondutor	Tipo 'p'	Tipo 'n'
Material	$Yb_{14}MnSb_{11}$	$Si_{80}Ge_{20}$
Altura da perna (mm)	4	4
Largura da perna (cm)	1	1
Comprimento da perna (cm)	1	1
Coeficiente de Seebeck 'S' (V/K)	1,83E-04	-2,49E-04
Condutividade Térmica 'k' (W/m-K)	7,22E-01	2,98E+00
Condutividade Elétrica ' σ ' (S/m)	19100	33300
Figura de Mérito	1,06	0,83
Propriedades por módulo (par pn)		
Largura da cerâmica em módulo (cm)	3	
Comprimento da cerâmica em módulo (cm)	5	
Área da cerâmica em cada módulo (cm ²)	15	
Fração de Preenchimento	0,1333	

Tabela 3 - Dados relativos aos materiais termoelétricos

4.3 Cálculo Computacional

Após a escolha de todos os parâmetros geométricos e das condições de contorno, iniciou-se a resolução das equações que compõem o modelo e a análise dos resultados, utilizando a ferramenta computacional Wolfram Mathematica. Condições semelhantes às reais foram simuladas a fim de medir o desempenho da unidade na recuperação de energia dos gases de exaustão de um motor de combustão interna.

Os valores dos parâmetros de entrada e das condições de contorno do sistema a ser modelado (Temperaturas de entrada dos fluidos de trabalho, características físicas escolhidas para o sistema, propriedades termodinâmicas dos materiais selecionados para a estrutura, propriedades termoelétricas dos materiais escolhidos para a confecção dos pares

de semicondutores e vazões) além das equações que regem a atividade dos geradores termoelétricos, dos escoamentos e dos trocadores de calor foram implementados no código.

O fator KII (a condutância equivalente à energia que escapa da face quente direto para a face fria, por convecção e por radiação) aqui foi considerado desprezível, supondo um sistema perfeitamente isolado. Esta aproximação é utilizada por LeBlanc et al. (2014) e pode ser considerada válida (dando uma boa aproximação dos resultados reais) garantindo-se o máximo de isolamento térmico possível para o sistema ao ser construído. Já RL aqui é considerado inicialmente igual à resistência interna do sistema tornando $m = RL/R = 1$, o que maximiza a potência elétrica gerada e ainda minimiza o custo do sistema (LeBlanc et al., 2014).

Os gases de exaustão são considerados como ar e o fluido de arrefecimento como água. Outras considerações feitas aqui são: os escoamentos são totalmente desenvolvidos, os dutos de escoamento são lisos (sem rugosidade), o sistema atua em regime permanente, resistências térmicas de contato entre materiais e de condução através da cerâmica das células foram consideradas desprezíveis e as temperaturas médias nas fontes fria e quente foram utilizadas para fins de troca de calor.

5 | RESULTADOS

Os dados esperados como resposta do programa são: a potência total gerada pelos módulos, a potência extra necessária para o bombeamento dos gases através do sistema, a potência líquida (potência gerada menos potência de bombeamento), eficiência do módulo, eficiência máxima para esta configuração dos módulos e materiais, tensão e corrente elétrica geradas. Estes dados podem então ser vistos na Tabela 4.

Encontrou-se uma satisfatória potência gerada de 1,89 KW, um pouco mais do que o dobro dos 975 W encontrados por Baker et al. (2012) para um sistema com geometria semelhante. Um valor tão alto se deve principalmente a temperatura da fonte quente que é muito mais alta neste trabalho (cerca de 1100 K em comparação com 800 K), já que como visto por Hendricks et al. (2016) a temperatura da fonte quente é um dos fatores que mais influenciam no desempenho do sistema. O coeficiente de convecção do escoamento de fluido de exaustão $h_{\text{exh}} = 74,65 \text{ W/m}^2\text{-K}$ encontrado está muito próximo do estimado em outras pesquisas como (Baker et al., 2012) que encontrou $70 \text{ W/m}^2\text{-K}$ para um duto retangular e Weng & Huang (2013) que encontraram $65 \text{ W/m}^2\text{-K}$ para um duto hexagonal aletado. O coeficiente de convecção do escoamento do fluido de arrefecimento encontrado é $h_{\text{cool}} = 1384,0 \text{ W/m}^2\text{-K}$ é também próximo ao encontrado por Baker et al. (2012) em sua análise semelhante.

Resultados		
Face do sistema	Lado Frio	Lado Quente
Temperatura de Entrada do Fluido (°C)	80	921,6
Temperatura de Saída do Fluido (°C)	95,42	664,3
Temperatura de Filme (°C)	87,62	794,7
Temperatura na Superfície do Duto (°C)	109,8	688,0
Temperatura na Face da Célula (°C)	102,9	686,9
Coeficiente de Convecção 'h' (W/m ² -K)	1384,0	74,65
Fluxo de Calor 'Q' (KW)	25,1	27,0
Potência Gerada (W)	1935,4	
Potência de Bombeamento (W)	48,84	
Potência Líquida (W)	1887	
Eficiência térmica	7,16%	

Tabela 4 – Resultados da análise com o EES

É importante lembrar que esses coeficientes são valores médios considerados a temperatura média de cada escoamento, uma vez que o coeficiente local de convecção depende da temperatura que é diferente para cada posição axial dos trocadores. A alta tensão elétrica encontrada se deve ao fato de os materiais terem uma figura de mérito alta na faixa de temperatura, também à alta temperatura da fonte quente e a grande quantidade de pares termoelétricos aplicados em série. A baixa eficiência de apenas 7% encontra-se dentro do esperado já que é característico das células termoelétricas ter uma eficiência bastante baixa, entre 5 e 8% (Hatami et al., 2014).

Todos estes cálculos, entretanto, foram realizados baseados na situação de potência máxima gerada, em que $R_L = R$. Esta circunstância não é facilmente alcançável e pode tornar necessário o uso de sistemas condicionadores de potência. Estes acarretariam considerável custo extra podendo penalizar o projeto. Portanto é relevante analisar no sistema o efeito de uma possível discrepância entre a resistência interna e a resistência do circuito externo. Os resultados desta análise estão representados nas Figura 6 e Figura 7.

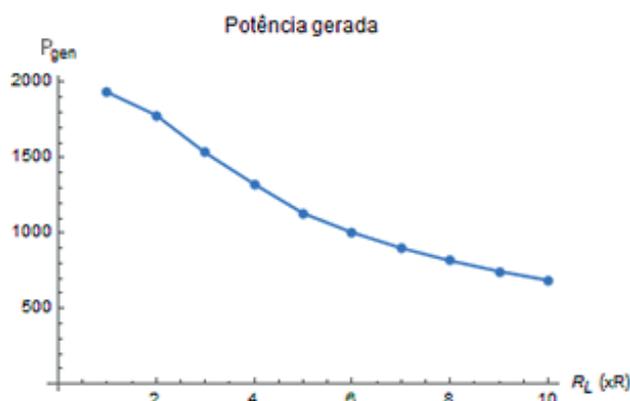


Figura 6 – Potência gerada x Resistência do circuito

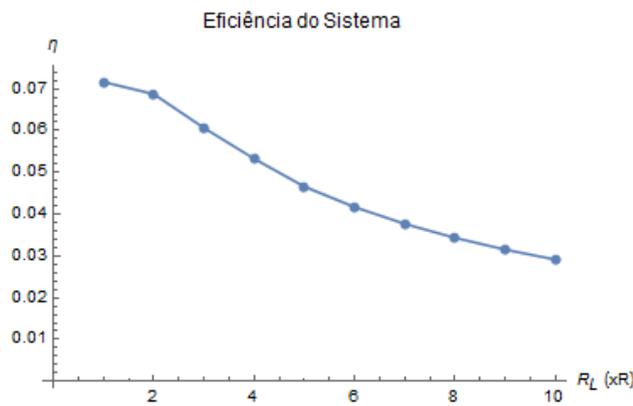


Figura 7 – Eficiência do sistema x Resistência o circuito

A eficiência do sistema também cai, mas em ritmo mais lento. Na verdade, a condição de máxima eficiência ocorre em $m = (1+ZTm)^{1/2}$ (LeBlanc et al., 2014), o que acontece bastante próximo de $m = 1$, esclarecendo o comportamento da curva na Figura 7. Apesar da diminuição destes valores, a tensão elétrica não se altera nestas situações, já que como visto em (12) ela não depende da resistência elétrica do circuito externo.

É possível perceber que a potência gerada pode ainda ser satisfatória para pequenas variações da condição de máxima potência. Porém, para valores muito altos de R_L tem-se uma ampla diminuição de potência, que ocasionaria correntes elétricas muito baixas e indesejáveis para alimentar baterias e dispositivos eletrônicos.

6 | CONCLUSÃO

Através de uma extensa pesquisa bibliográfica e investigação do estado da arte em relação à recuperação de calor veicular e geradores termoelétricos, foi possível projetar um sistema relativamente simples e prático a ser acoplado no exaustor de um motor de combustão interna. Apesar da escolha dos dados de um motor a gasolina o sistema pode ser facilmente adaptado a um motor diesel por meio da mudança de alguns parâmetros.

Após a modelagem do sistema foi possível simulá-lo com ajuda do software *Wolfram Mathematica*, e solucionar as equações que regem seu funcionamento. Os resultados encontrados para as devidas condições de contorno foram bastante satisfatórios sendo encontrados valores mais altos de potência e tensão elétrica do que em trabalhos semelhantes na literatura.

A viabilidade econômica do sistema deve ser ainda avaliada (devido principalmente ao custo da grande quantidade de termopares) para garantir que os resultados possam ser reproduzidos em um protótipo real. Há também abertura para futuras pesquisas envolvendo a melhoria do sistema, principalmente no tocante aos trocadores de calor, que podem ser modificados em busca de uma geometria ótima.

REFERÊNCIAS

- Angrist, S. W. (1976). **Direct energy conversion**. 3^a ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc.
- Baker, C., Vuppuluri, P., Shi, L., & Hall, M. (2012). **Model of heat exchangers for waste heat recovery from diesel engine exhaust for thermoelectric power generation**. *Journal of Electronic Materials*.**41**:1290-1297.
- Brace, C. J., Burnham-Slipper, H., Wijetunge, R. S., Vaughan, N. D., Wright, K., & Blight, D. **Integrated cooling systems for passenger vehicles**. SAE World Congress, **2001-01-1248**.
- Empresa de Pesquisa Energética, EPE. (2016). **Relatório síntese: ano base 2015**. Acedido em 5 de Maio de 2017, no Web site da Empresa de Pesquisa Energética: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben/balanco-energetico-nacional-2016> .
- Hatami, M., Ganji, D. D., & Gorji-Bandpy, M. (2014). **A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.**37**:168-181.
- Hendricks, T. J., Yee, S., & LeBlanc, S. (2016). **Cost scaling of a real-world exhaust waste heat recovery thermoelectric generator: A deeper dive**. *Journal of Electronic Materials*.**45**:1751-1761.
- Kallel, A. C., Roux, G., & Martin, C. L. (2013). **Thermoelectric and mechanical properties of a hot pressed nanostructured n-type Si80Ge20 alloy**. *Materials Science and Engineering: A*.**564**:65-70.
- Karvonen, M., Kapoor, R., Uusitalo, A., & Ojanen, V. (2016). **Technology competition in the internal combustion engine waste heat recovery: A patent landscape analysis**. *Journal of Cleaner Production*.**112**:3735-3743.
- LeBlanc, S., Yee, S. K., Scullin, M. L., Dames, C., & Goodson, K. E. (2014). **Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.**32**:313-327.
- Liang, X., Sun, X., Tian, H., Shu, G., Wang, Y., & Wang, X. (2014). **Comparison and parameter optimization of a two-stage thermoelectric generator using high temperature exhaust of internal combustion engine**. *Applied Energy*.**130**:190-199.
- Liu, X., Deng, Y. D., Li, Z., & Su, C. Q. (2015). **Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application**. *Energy Conversion and Management*.**90**:121-127.
- Nochetto, H., Taylor, P., & Maddux, J. R. (2013). **High temperature thermoelectric materials for waste heat regeneration**. Acedido em 15 de Maio de 2017, no Web site da: Defense Technical Information Center, Army Research Lab Adelphi MD sensors and Electron Devices Directorate: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a570989.pdf>
- Power Solutions. (2013). **1.6L Industrial Engine**. Acedido em 24 de Maio de 2017, no Web site da: Interlink Supply: https://interlinksupply.com/prod_manuals/Sapphire-Blueline%20Manuals/VORTEC%201.6L%20Engine%20Manual.pdf .
- Saidur, R., Rezaei, M., Muzammil, W. K., Hassan, M. H., Paria, S., & Hasanuzzaman, M. (2012). **Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.**16**:5649-5659.
- Singh, J., & Verma, S. S. (2013). **A comparison of figure of merit for some common thermocouples in the high temperature range**. *Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering*.**13**:6-12.
- Stabler, F. **Automotive thermoelectric generator design issues**. Paper presented at the DOE

Weng, C., & Huang, M. (2013). **A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator.** International Journal of Thermal Sciences.71:302-309.

Yang, J. **Potential applications of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry.** Paper presented at the Thermoelectrics, 2005. ICT 2005. 24th International Conference On, pp. 170-174.

Zhang, X., & Zhao, L. (2015). **Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity.** Journal of Materiomics.1:92-105.

VARIAÇÃO DA ALCALINIDADE DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO COM BIODIESEL

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 16/04/2020

Elba Gomes dos Santos Leal

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia – IFBA, Curso de Petróleo e Gás. Simões Filho – BA
<http://lattes.cnpq.br/3306805345463372>

Rui Carlos de Sousa Mota

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia – IFBA, Curso de Petróleo e Gás. Simões Filho – BA
<http://lattes.cnpq.br/8101200419429469>

Ricardo Guilherme Kuentzer

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia – IFBA, Curso de Petróleo e Gás. Simões Filho – BA
<http://lattes.cnpq.br/0496839737387626>

Bento Pereira da Costa Neto

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia – IFBA, Curso de Petróleo e Gás. Simões Filho – BA
<http://lattes.cnpq.br/1365170364446088>

Danilo Matos Moura

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia – IFBA, Curso de Engenharia Mecânica, Simões Filho – BA
<http://lattes.cnpq.br/8335813115816928>

propriedades específicas que tem como função principal promover estabilidade do poço a fim de assegurar a integridade física dos profissionais envolvidos e garantir a segurança do poço e do meio ambiente. Fluido de perfuração que utilizam componentes sintéticos são uma classe relativamente nova de lamas de perfuração, que são particularmente úteis em águas profundas e poços direcionais. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar uma alternativa de um fluido ecologicamente mais viável comparado com os fluidos de perfuração a base óleo, bem como eliminar os problemas causados pela água as formações rochosas solúveis neste solvente. Com isso, uma grande variedade de produto químico vem sendo desenvolvidos para substituir o óleo diesel e o óleo mineral dos fluidos de perfuração. A escolha do fluido de perfuração e a manutenção de suas propriedades influenciam diretamente no processo. Dentre as análises químicas realizadas em um fluido de perfuração tem-se a determinação do teor de alcalinidade que possui a finalidade de verificar a quantidade de cal nos fluidos de perfuração. Esta informação é importante, uma vez que interfere no controle dos parâmetros reológicos do fluido. Valores elevados de alcalinidade aumentam os valores dos

RESUMO: Durante a perfuração de poços, é utilizado um fluido de perfuração com

parâmetros géis e viscosidade, o que dificulta o bombeamento e a tixotropia do fluido de perfuração. Fluidos de perfuração utilizando biodiesel em sua composição foram preparados no laboratório e submetidos a um envelhecimento em uma estufa de rolagem de forma a verificar a variação do teor de alcalinidade, com alterações da quantidade de biodiesel, quantidade de bentonita, temperatura e do tempo de forno. Os resultados obtidos ilustraram que um aumento da temperatura de forno, provocou a instabilidade dos fluidos de perfuração e em alguns casos o fluido de perfuração tornou-se instável e de difícil recuperação.

PALAVRAS-CHAVE: Fluidos de perfuração, biodiesel, alcalinidade

VARIATION OF THE ALKALINITY OF DRILLING FLUIDS WITH BIODIESEL

ABSTRACT: During well drilling, a drilling fluid with specific properties is used, whose main function is to promote stability of the well in order to ensure the physical integrity of the professionals involved and to ensure the safety of the well and the environment. Drilling fluids using synthetic components are a relatively new class of drilling muds, which are particularly useful in deep water and directional wells. They were developed with the objective of providing an alternative of an ecologically more viable fluid compared to oil-based drilling fluids, as well as eliminating the problems caused by water and the rock formations soluble in this solvent. As a result, a wide variety of chemicals are being developed to replace diesel oil and mineral oil in drilling fluids. The choice of drilling fluid and the maintenance of its properties directly influence the process. Among the chemical analyzes performed on a drilling fluid there is the determination of the alkalinity content that has the purpose of verifying the amount of lime in the drilling fluids. This information is important, since it interferes with the control of the rheological parameters of the fluid. High alkalinity values increase the values of the gels and viscosity parameters, which makes pumping and thixotropy of the drilling fluid difficult. Drilling fluids using biodiesel in its composition were prepared in the laboratory and subjected to aging in a rolling oven in order to verify the variation in the alkalinity content, with changes in the amount of biodiesel, amount of bentonite, temperature and oven time . The results obtained illustrated that an increase in the furnace temperature caused the drilling fluids to become unstable and in some cases the drilling fluid became unstable and difficult to recover.

KEYWORDS: Drilling fluids, biodiesel, alkalinity

1 | INTRODUÇÃO

Fluido de perfuração pode ser definido como misturas de componentes líquidos e sólidos e, em algumas situações, gases, tendo como uma das principais propriedades é servir como um veículo para a remoção dos cascalhos do fundo do poço para a superfície.

Segundo Caenn, Darley & Gray (2014), atualmente, diversas são as aplicações dos fluidos de perfuração, dentre estas podem-se citar: resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração; manter a estabilidade das paredes do poço e prevenir a entrada de fluidos indesejáveis para dentro do poço.

Além das características relatadas anteriormente, um fluido de perfuração não pode: ser prejudicial ao pessoal envolvido na perfuração; poluir o meio ambiente; interferir na

produtividade normal do poço e não corroer nem desgastar os equipamentos de perfuração e completação envolvidos na operação.

De acordo com Santos, (2013), uma das mais importantes funções dos fluidos de perfuração é exercer uma pressão nas paredes do poço superior à pressão dos fluidos contidos nas formações rochosas perfuradas pela broca. Se, de alguma forma, a pressão no poço se tornar menor que a pressão das formações rochosas, poderá ocorrer fluxo de fluido destas formações para dentro do poço. Este fluxo ocorre de forma indesejável e recebe o nome de kick. Caso o mesmo não seja controlado de forma eficiente poderá ocasionar a perda do poço, perda de tempo produtivo da sonda e, dependendo da situação perda de vidas humanas.

Diante da necessidade de se manter as funções dos fluidos de perfuração utilizados, tem-se a necessidade de testes diários e frequentes de suas propriedades físicas e químicas, tanto em campo como em laboratório.

Dentre as análises químicas realizadas em um fluido de perfuração tem-se a alcalinidade, realizada para determinar a quantidade de cal nos fluidos de perfuração que possuem cal em sua composição. O teor de alcalinidade dos fluidos é obtido a partir da titulação com a finalidade de determinar a quantidade total de cal, solúvel e insolúvel no sistema. O procedimento utilizado consiste na titulação do filtrado com ácido sulfúrico padrão até o ponto final da fenolftaleína (Pf) e até o ponto final do alaranjado de metila (Mf) e a titulação do fluido de perfuração até o ponto final da fenolftaleína (Pm).

Os testes de alcalinidade de Pf e Mf possuem a finalidade de determinar as concentrações de íons hidroxila, carbonato e bicarbonato. Esta informação é importante para quantificar a presença de íons hidroxila livres no fluido, uma vez que se este parâmetro não for controlado, irá influenciar no controle dos parâmetros reológicos do fluido.

Segundo Stefan, (1982), o valor das alcalinidades dos fluidos de perfuração podem ser interpretados através da relação entre os valores de Pf e de Mf. Esta relação está ilustrada na Tabela 1.

Casos	Relação entre Pf e Mf	Estado do fluido de perfuração
I	$Pf = Mf$	Fluido estável em boas condições.
II	$2 Pf > Mf$	Fluido com tendências à instabilização, embora apresente boas condições.
III	$2 Pf = Mf$	Fluido instável, porém recuperável.
IV	$2 Pf < Mf$	Fluido instável, de difícil recuperação
V	$Pf = 0$	Fluido instável de recuperação muito difícil.

Tabela 1. Valores da alcalinidade e do estado do fluido de perfuração

Fluido de perfuração que utilizam uma base sintética, conhecidos como SBFS, são uma classe relativamente nova de lamas de perfuração, particularmente úteis em águas profundas e poços direcionais. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar uma alternativa para um fluido ecologicamente mais viável comparado com os fluidos de

perfuração a base óleo utilizados atualmente, bem como eliminar os problemas causados pela água nas formações rochosas solúveis neste solvente.

De forma geral os fluidos sintéticos são uma tentativa de utilizar qualidades mistas entre fluidos de perfuração à base água (WBM) e a base óleo (OBM) respectivamente, bem como diminuir os problemas causados por estes dois tipos de fluidos.

Com o intuito de eliminar estes problemas, uma grande variedade de produtos químicos vem sendo desenvolvidos desde 1993 para substituir o óleo diesel e o óleo mineral como base dos fluidos de perfuração.

Desta forma, o estudo da viabilidade de fluidos de perfuração utilizando biodiesel como fase óleo, justifica-se pela necessidade jurídica e ambiental de trabalhar-se com fluidos ambientalmente compatíveis, o qual apresenta características semelhantes aos sistemas base óleo convencionais. Justifica-se ainda pelo fato de que o biodiesel já vem sendo utilizado como combustível no país, possuindo normas e especificações já padronizadas.

Também possibilitará o uso de fluido de perfuração a base óleo com custo reduzido, garantindo assim, o uso destes, em campos petrolíferos do Brasil que necessite deste tipo de fluido.

Além destes fatores, tem-se também os impactos econômico, social e ambiental proporcionados por esta pesquisa, uma vez que o seu estudo esta focado na utilização de uma matéria-prima que produza baixo impacto ambiental, minimizando a geração de poluentes para o meio ambiente, bem como na geração de recursos humanos direcionados a trabalhar com modelos de perfuração mais realísticos da região a ser estudada.

Desta forma, este trabalho de pesquisa tem como finalidade a preparação de um fluido de perfuração com biodiesel em sua composição e determinação a influência das variáveis: quantidade de biodiesel, quantidade de bentonita, temperatura e tempo de forno de rolagem sobre a alcalinidade, expressa pela relação Pm/Pf.

Justificativa

O desenvolvimento de novos reservatórios de óleo envolve a fase de exploração e produção de petróleo e gás a qual é composta de diversas etapas. Dentre estas etapas, tem-se a pesquisa de produtos químicos específicos.

A pesquisa de produtos químicos específicos para a área de exploração de petróleo difere de acordo com o tipo de campo a ser explorado. Por exemplo, a utilização de produtos químicos, tende a ser mais intensa para campos “offshore”, onde os investimentos fixos são significativamente maiores que para os campos “onshore”.

De forma geral, a pesquisa de novos produtos para a área de exploração e produção de petróleo e gás possui desenvolvimento crescente, com média de 8% ao ano até 2021, e o principal setor de crescimento será a atividade de perfuração, principalmente “offshore” e “onshore” em reservas não convencionais. Neste segmento, os fluidos de perfuração representam cerca de 70% das vendas com crescimento previsto até 2021 de 18% ao ano, principalmente devido a intensificação da atividade de perfuração de poços de petróleo “offshore”, em especial na área do pré-sal.

A perfuração destes poços demanda da utilização de produtos que melhorem o desempenho da perfuração em condições de altas temperaturas e pressões. Além disso, os requisitos ambientais exigidos necessitam que os mesmos possuam maior biodegradabilidade e menor toxicidade, condições estas que elevam os valores dos fluidos de perfuração de base parafínica utilizados atualmente.

São muitas as propriedades dos fluidos de perfuração e todas possuem importância relevante para o projeto de poço. Historicamente, o propósito primordial dos fluidos de perfuração era servir como veículo para a remoção dos cascalhos do poço, mas atualmente, as suas diversas aplicações dificultam a atribuição de funções específicas.

Dentre algumas funções dos fluidos tem-se que o fluido não deve: ser danoso nem prejudicial ao meio ambiente e nem a equipe de trabalho; não interferir na produtividade do poço nem contaminar as formações rochosas; corroer ou desgastar os equipamentos de perfuração e possuir custo acessível a sua produção.

Desta forma, a manutenção das propriedades físicas e químicas de um fluido de perfuração deve ser monitorada constantemente e controladas dentro dos limites preestabelecidos no programa do poço.

Estado da arte/Referencial teórico

Durante a perfuração de poços de petróleo, é função do fluido de perfuração exercer uma pressão nas paredes do poço superior a pressão dos fluidos contidos nos poros das formações rochosas, como gás, água e óleo.

Se por algum motivo, a pressão dentro do poço se tornar menor que a pressão das formações rochosas, e esta possuir permeabilidade suficiente, um influxo de fluido da formação para dentro do poço deverá ocorrer. Esse influxo ocorre de forma indesejável, e recebe o nome de ‘kick’. Caso não seja controlado, poderá se tornar um “blowout”, o que causa prejuízos e perdas irre recuperáveis a uma sonda de perfuração.

Os fluidos de perfuração são divididos em dois tipos gerais: fluidos de base água (WBMs) e fluidos de óleo (OBMs), dependendo da característica da fase contínua da lama. Desta forma, tanto os fluidos WBMs como os OBMs podem conter água.

A utilização de um ou outro tipo vai depender das necessidades da perfuração, da formação a ser perfurada, bem como dos requisitos para descarte do fluido depois que ele não é mais necessário.

Os fluidos de perfuração que utilizam a água como fase contínua possuem sua composição definida de acordo com as propriedades das substâncias dissolvidas na água como álcalis, sais e surfactantes e também de acordo com os materiais solúveis ou dispersíveis nas formações a serem perfuradas.

Já os fluidos de perfuração que possuem óleo como fase contínua utilizam frequentemente, o óleo diesel, o óleo mineral e o óleo mineral de baixa toxicidade. Como alguma quantidade de água sempre estará presente, o fluido base óleo precisa conter agentes emulsificantes de água.

Devido a sua fase contínua, os fluidos base óleo tornam-se preferidos por proporcionar melhores taxas de penetração, inibição de folhelhos, estabilidade do poço, elevada lubricidade, estabilidade térmica e alta tolerância ao sal. Entretanto, estão sujeitos à regulação ambiental rigorosa em relação a descarga e a reciclagem.

Historicamente, os fluidos base óleo foram os primeiros a serem utilizados. Eram preparados com óleo cru e, mas recentemente com óleo diesel. Devido a problemas de toxicidade, associados a esses óleos, em particular para uso em alto mar, têm-se desenvolvidos lamas de perfuração alternativas substituindo a fase óleo por ésteres de ácidos graxos e hidrocarbonetos sintéticos de cadeias ramificadas.

Fluido de perfuração à base sintética (SBFS) é uma classe relativamente nova de lamas de perfuração, que são particularmente úteis em águas profundas e poços direcionais. Eles foram desenvolvidos como alternativa as limitações de desempenho dos fluidos base água e também em resposta as limitações ambientais dos fluidos base óleo. Esses fluidos são bem utilizados em regiões marítimas onde o descarte do cascalho é proibido quando se utiliza fluidos de base óleo. Como consequência, são bem mais caros quando comparados com os fluidos base óleo.

De forma geral os fluidos sintéticos são uma tentativa de utilizar qualidades mistas entre fluidos de perfuração à base água (WBM) e a base óleo (OBM) respectivamente.

Não se sabe quando começou a usar o fluido de perfuração sintético, sabe-se, portanto que seu uso se dá como uma tentativa de eliminar o dano causado à água pelo sistema de perfuração. Contudo, o óleo cru é muito difícil de usar como fluido de perfuração, podendo assim ser substituído por óleo refinado e asfalteno.

No entanto o uso do fluido de perfuração a base óleo é crítico, pois este não é biodegradável, levando a problemas de poluição ao meio ambiente, como por exemplo, na descarga de cascalhos saturados com óleo. Com o intuito de eliminar estes problemas, uma grande variedade de produto químico vem sendo desenvolvidos desde 1993 para substituir o óleo diesel e o óleo mineral como base dos fluidos de perfuração.

Muitos destes fluidos comportam-se mais como fluido a base água do que a base óleo, no entanto a escolha de um fluido em particular é feita com base em muitos fatores, sendo o custo o principal deles.

O desenvolvimento dos fluidos sintéticos é recente, datando da década de 90 o primeiro poço comercialmente perfurado com um fluido a base de éster, na costa da Noruega. A primeira geração de fluidos sintéticos foi composta por ésteres, éteres, poli alfa-olefinas (PAOs) e acetatos.

Na segunda metade da década de 90, pesquisas originaram a segunda geração dos fluidos sintéticos, compostas pelos alquil-benzenos lineares (LABs), alfa-olefinas lineares (LAOs), olefinas internas (IOs) e parafinas lineares (LPs) (SILVA 2003).

Estudos realizados na Noruega empregando leitões de mar simulados indicaram que, quando se consideram simultaneamente os efeitos combinados de degradação do fluido e do impacto na fauna marinha, as LAOs e os ésteres de ácido graxos insaturados são os menos prejudiciais ao ambiente oceânico.

Contudo, os desenvolvimentos da segunda geração, que objetivavam a redução dos custos do fluido, trouxeram um aumento na toxicidade em relação aos fluidos da geração anterior.

O tema é recente e vem sendo objeto de intensas pesquisas, devido à existência de lacunas nos dados experimentais, sendo as PAOs e as LAOs os fluidos sintéticos de maior emprego na Europa (GUIMARÃES, BARROS & ROSSI, 2008).

Os descartes (fluidos e cascalhos) gerados durante a perfuração são tratados para atender a legislação ambiental vigente. Os aditivos utilizados no preparo e no tratamento dos fluidos são testados segundo normas técnicas elaboradas para garantir sua qualidade e em conformidade com a legislação ambiental.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no IFBA, campus Simões Filho. No Laboratório de Petróleo e gás. Inicialmente foram preparados fluidos de perfuração com a seguinte composição:

- Água – quantidade suficiente para: (QSP);
- Soda cáustica – 1,0 a 2,0 (Lb/bbl);
- Cal hidratada – 2,0 a 3,0 (Lb/bbl), e
- Amido – 8,0 a 12,0 (Lb/bbl).

Foi utilizada também na composição dos fluidos de perfuração, biodiesel e uma argila ativada (bentonita) cuja composição foi definida de acordo com o planejamento fatorial experimental utilizado, nas quantidades ilustradas na Tabela 2.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um planejamento fatorial experimental do tipo 2^3 com 3 repetições no ponto central de forma a garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos experimentos realizados.

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Quantidade de biodiesel (mL)	20	40	60
Quantidade de bentonita (Lb)	16	18	20
Variação da temperatura (°C)	40	60	80
Variação do Tempo (horas)	2	4	6

Tabela 2. Variáveis de entrada e níveis para o planejamento fatorial experimental estudado.

Desta forma foram preparados 19 fluidos de perfuração e cada preparação ocorreu de acordo com a prática de campo, que consistia em adicionar os aditivos, um a um, sob agitação a uma velocidade constante de 13.000 rpm em agitador *Hamilton Beach*, modelo 936, ilustrado na Figura 1, e permanecendo 5 min sob agitação a cada acréscimo de aditivo.



Figura 1. Equipamento Hamilton Beach Mixer, modelo 936. Fonte: Laboratório de fluídos do IFBA, 2016.

Após a preparação dos fluidos de perfuração, era determinado o teor de alcalinidade. Esta foi determinada através da titulação com ácido sulfúrico, de uma amostra de fluido de perfuração, aproximadamente 1,0 mL diluída em 50 mL de água destilada, contendo como indicador a fenolftaleína.

Foram avaliados os seguintes tipos de alcalinidade presente em um fluido: alcalinidade parcial do filtrado, alcalinidade da lama e alcalinidade total do filtrado.

Segundo Moraes, (2009) os testes de rotina podem ser registrados de três maneiras distintas:

1. Alcalinidade parcial do filtrado (Pf), usando a fenolftaleína como indicador, como volume de uma solução tituladora de ácido sulfúrico N/50, em cm³;
2. Alcalinidade parcial do fluido (Pm), usando a fenolftaleína como indicador, como volume de uma solução tituladora de ácido sulfúrico N/50, em cm³;
3. Alcalinidade total do filtrado (Mf), usando o metilorange, como volume de uma solução tituladora de ácido sulfúrico N/50, em cm³

Para simular o efeito do envelhecimento do fluido de perfuração enquanto este circula no poço, o mesmo foi colocado em uma célula de envelhecimento, ilustrada na Figura 2.

Esta célula de envelhecimento foi colocada em uma estufa rotativa, ilustrada na Figura 3, a qual foi configurada com temperatura e tempo de envelhecimento para o fluido de acordo

com o planejamento fatorial experimental da Tabela 2.

A estufa rotativa teve como função simular as condições temperatura e tempo de circulação do fluido dentro do poço, através de movimento dos rolos motorizados que giram a célula de envelhecimento dentro do forno, conforme a figura 3.

Após completado o tempo de forno definido, as células de envelhecimento eram retiradas de dentro do forno, e os testes de alcalinidade novamente realizados para comparação com os valores anteriormente determinados.



Figura 2 –(a) Célula de envelhecimento, (b) Equipamento Fann Estufa Rotativa Roller Oven.
Fonte: Laboratório de fluidos do IFBA, 2016.

3 | RESULTADOS

Através da realização dos experimentos para determinação da alcalinidade com os fluidos de perfuração preparados, foi possível obter a análise de variância (ANOVA), obtida mediante a utilização de um programa estatístico. Os valores obtidos estão ilustrados na Tabela 2.

Parâmetros do modelo	Valores obtidos
% de variância explicada	99,86
Coeficiente de correlação	0,99
Teste F calculado (F_c)	688,87
Teste F tabelado (F_t 5%)	1,66
Teste F (F_c/F_t)	415,00

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para fluidos de perfuração com biodiesel.

O teste F foi utilizado para investigar se o modelo proposto explica uma quantidade significativa de variação nos valores experimentais. O valor do teste F obtido a partir dos dados experimentais deve ser maior que o valor do teste F tabelado para que o modelo seja significativo, ou seja, válido estatisticamente, como foi apresentado na Tabela 2, mostrando que o modelo linear encontrado (ao nível de 95% de confiança) foi estatisticamente significativo

e altamente preditivo, conforme Barros Neto, (2001).

Os resultados obtidos neste trabalho, ilustrados nas Figuras 3, 4 e 5, mostraram as variações nos seguintes parâmetros: quantidade de biodiesel (mL), quantidade de bentonita (Lb), temperatura (°C) e tempo (horas) sobre a alcalinidade dos fluidos de perfuração, após o envelhecimento.

A Figura 4 ilustra a influência da quantidade de biodiesel e da temperatura de forno sobre a alcalinidade dos fluidos de perfuração. Foi observado nesta Figura que a quantidade de biodiesel utilizada nestes experimentos não influenciou de forma significativa os valores da alcalinidade do fluido de perfuração, após as condições de envelhecimento de forno.

A Figura 5 ilustra a influência da quantidade de bentonita e da temperatura sobre a alcalinidade dos fluidos de perfuração. Pode-se observar nesta figura que o valor da relação P_m/P_f para a alcalinidade diminuiu de 5,0 para temperatura de 20°C para 1,8 em uma temperatura de 80°C.

Na Figura 6 tem-se a influência da temperatura e do tempo de forno sobre a alcalinidade do fluido de perfuração, ilustrada pela relação P_m/P_f . Pode-se observar, nesta figura que variações de temperatura de forno apresentaram influência significativa para a diminuição da alcalinidade.

Segundo Stefan, 1982, deve-se manter a relação P_m/P_f na faixa de 4,0 a 5,0 e estes valores obtidos devem ser iguais entre si, conforme recomendação da Tabela 1. Estes valores foram observados quando se trabalhou com temperaturas de forno de 50°C a 75°C.

Experimentos realizados com uma temperatura de forno acima de 75°C e tempo de envelhecimento superior a 4 horas ocorreu a instabilidade dos fluidos de perfuração, porém o mesmo pode ser recuperado para as condições iniciais. Em temperaturas de 100°C e tempo de forno de 6 horas o fluido de perfuração tornou-se instável e de difícil recuperação. Para temperaturas acima de 120°C ocorre a floculação excessiva dos fluidos.

A manutenção da relação P_m/P_f entre 4,0 e 5,0 é importante de forma a facilitar o controle da viscosidade do fluido. Valores maiores de 5,0 poderão provocar parâmetros de gás e viscosidade elevados, dificultando o bombeamento e a tixotropia do fluido de perfuração.

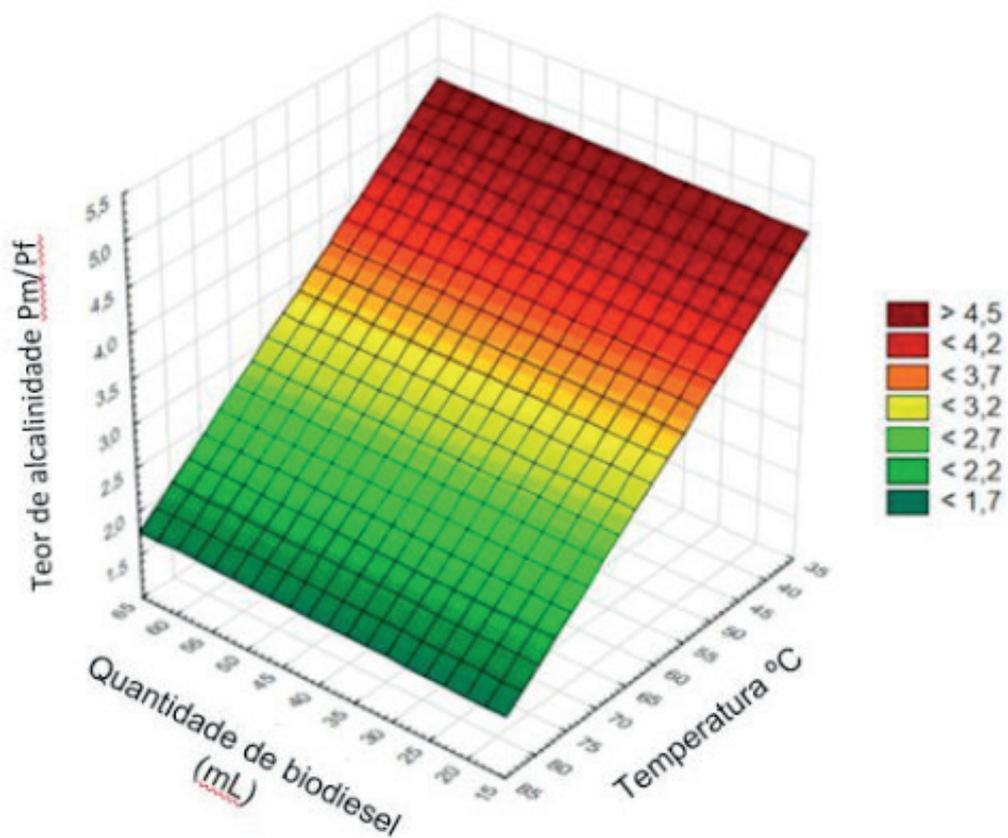


Figura3. Influência da quantidade de biodiesel (mL) e da temperatura (°C) sobre a alcalinidade (relação Pm/Pf) do fluido de perfuração.

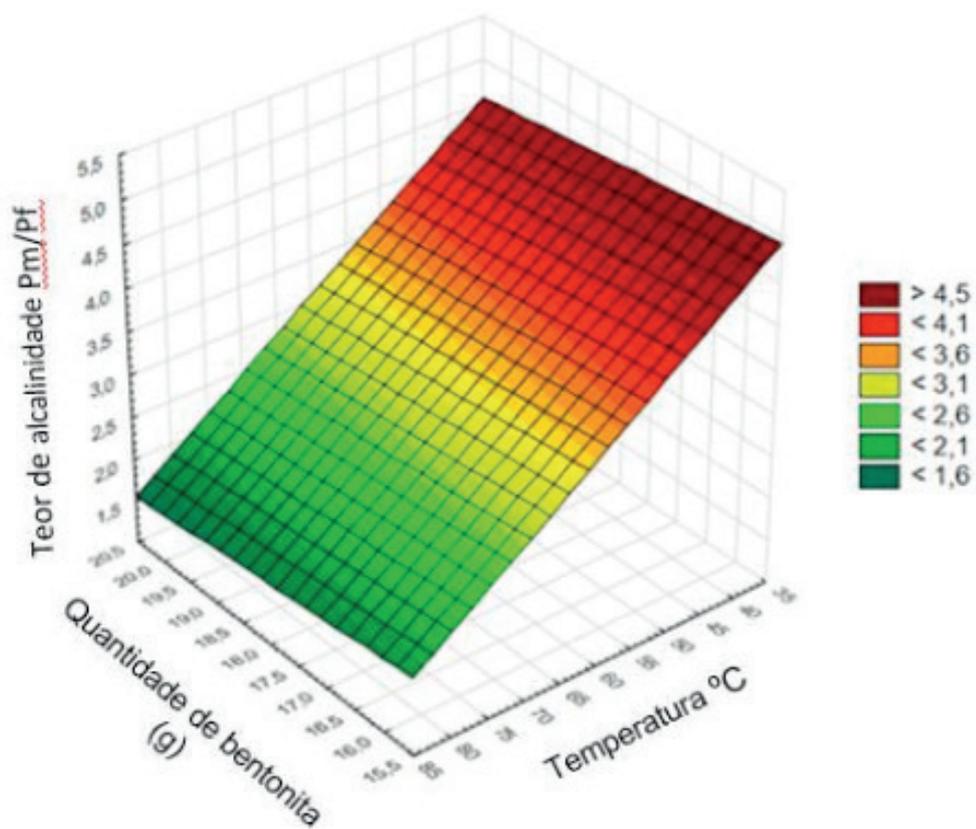


Figura 4. Influência da quantidade de bentonita (Lb) e da temperatura (°C) sobre a alcalinidade (relação Pm/Pf) do fluido de perfuração.

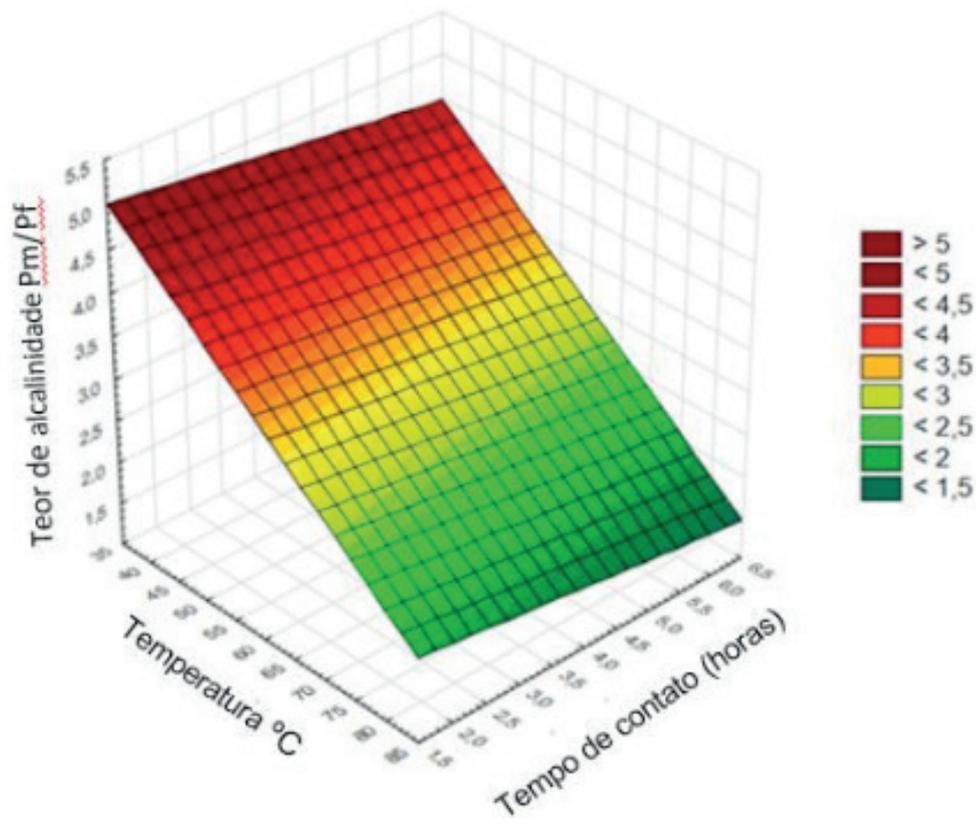


Figura 5. Influência da temperatura (°C) e do tempo de contato sobre a alcalinidade (relação Pm/Pf) do fluido de perfuração.

CONCLUSÃO

Através da utilização do planejamento fatorial experimental foi possível a realização dos experimentos para determinação da alcalinidade com os fluidos de perfuração preparados e a análise de variância (ANOVA), obtida mediante a utilização de um programa estatístico, o qual ilustrou que os resultados obtidos são válidos estatisticamente.

Experimentos foram realizados para verificar a influência das variáveis de entrada: quantidade de biodiesel, quantidade de bentonita, temperatura de forno e tempo de contato sobre a alcalinidade dos fluidos de perfuração. Os resultados obtidos ilustraram que a variável temperatura de forno foi o parâmetro que mais influenciou na alcalinidade do fluido de perfuração, a nível de 95 % de confiança, uma vez que um aumento desta variável, provocou uma diminuição da relação Pm/Pf para alcalinidade do fluido.

Para experimentos realizados com temperaturas maiores que 75°C e tempo de forno superior a 4 horas, verificou-se a instabilidade dos fluidos de perfuração. Em temperaturas de 100°C e tempo de forno de 6 horas o fluido de perfuração tornou-se instável e de difícil recuperação. Para experimentos temperaturas acima de 120°C ocorre a floculação excessiva dos fluidos.

REFERÊNCIAS

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R.; **Fluidos de Perfuração e Completação**. Editora Campus, 1ª. Edição, Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, O, L, A.; **Segurança de Poço na Perfuração**. Editora Blucher, São Paulo, 2013.

STEFAN, P.; **Manual de Fluidos de Perfuração**. Petrobras, Salvador, 1982.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.

Silva, C. T.- **Desenvolvimento de fluidos de perfuração a base de óleos vegetais**. Monografia de Graduação, Natal, janeiro de 2003

GUIMARÃES, I, B; ROSSI L, F, S. **Estudo dos Constituintes dos fluidos de Perfuração: Proposta de uma Formulação Otimizada e Ambientalmente Correta**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 4., 2006, Recife. Anais... Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, 2007. p.1-8.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 1.ed., v.1. Campinas-SP: Editora da UNICAMP, 2001.

MORAIS, A, J, P. **Análise Comparativa das Propriedades dos Fluidos de Perfuração para Poços de Água e Petróleo**. São Cristovão, 2009, 55 f. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2009.

COMPARAÇÃO DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DO SEGMENTO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

Data de aceite: 19/06/2020

Data de submissão: 03/04/2020

Mauro Donizeti Berni

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas – SP – (19)
CV <http://lattes.cnpq.br/1602054738205274>

Paulo Cesar Manduca

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas – SP – (19)
CV <http://lattes.cnpq.br/0410237154093098>

RESUMO: Os energéticos utilizados no segmento de revestimentos cerâmicos têm cinco usos finais principais: calor de processo, aquecimento direto, força motriz, iluminação e energia eletroquímica. Nestes usos finais, pode-se obter melhorias na eficiência energética, com reflexos no abatimento das emissões de gases causadores do efeito estufa. O nível de eficiência e o tipo de combustível utilizado no processo produtivo, juntamente com os equipamentos de controle das emissões, são responsáveis pelos índices de emissões desses gases. O objetivo deste trabalho é apurar os níveis de eficiência energética no processo produtivo de revestimentos

cerâmicos, os tipos de combustíveis utilizados e os níveis de emissões. Segue-se a comparação com os índices deste segmento industrial na Espanha, obtido junto à Agência Valenciana de Energia (AVEN). O trabalho mostra que o desempenho ambiental das empresas instaladas no Brasil é satisfatório e, em alguns casos, muito bom, vis-à-vis as congêneres para os quais se obteve dados junto à AVEN, para efeito de comparação. Comenta-se, também, no trabalho, as possibilidades da auto-produção de energia elétrica, em particular através da co-geração.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, emissões de gases, cogeração

COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY INDEXES AND EMISSIONS FROM CERAMICS TILES SEGMENT

ABSTRACT: The energy sources used in the ceramic tile segment have five main end uses: process heat, direct heating, driving force, lighting and electrochemical energy. In these end uses, improvements in energy efficiency can be achieved, with consequences on the reduction of greenhouse gas emissions. The level of efficiency and the type of fuel used in the production process, together with the emission control equipment, are responsible

for the emission rates of these gases. The objective of this work is to determine the energy efficiency indexes the production process of ceramic tiles, the types of fuels used and the levels of emissions. Finally, following the comparison with the contents of this industrial segment in Spain, obtained from the Valencia Energy Agency (AVEN). The results show that the environmental performance of companies in Brazil is satisfactory and, in some cases, very good, vis-à-vis the congeners for which data obtained by the AVEN. Comments is also at work, the possibilities of electricity self-production.

KEYWORDS: Energy efficiency, emission of gases, CHP

1 | INTRODUÇÃO

A indústria de transformação de minerais não-metálicos, onde se enquadra o setor cerâmico tem como principal segmento o de revestimentos cerâmicos. O Brasil é um grande produtor mundial de produtos cerâmicos, ao lado da Espanha, Itália e China.

Neste segmento industrial novos programas de conservação de energia envolvem não só tecnologias mais eficientes, mas também novos arranjos gerenciais. Tais programas visam otimizar o perfil e o mix do consumo de forma a diminuir tanto os gastos com energia, quanto os impactos ambientais associados ao consumo dela e garantir a competitividade, em um mercado globalizado, cujo principal requisito é a qualidade dos produtos com sustentabilidade (Berni, Bajay e Gorla, 2010). É relevante o consumo de energia térmica em sua cadeia produtiva. Possui forte penetração no mercado internacional no segmento de revestimentos. A expansão da exportação de revestimentos cerâmicos alavanca o desenvolvimento da indústria extrativa mineral e da construção civil, tendo multiplicadores também nos setores de serviços e comercial. A Figura 1 mostra a cadeia produtiva da indústria de revestimentos cerâmicos.

Uma característica típica da produção brasileira, e única no cenário mundial do setor, é a utilização de dois processos produtivos distintos em seu parque industrial: a Via Seca e a Via Úmida. Indústrias brasileiras de revestimento que operam por via seca tem como grande produtor nacional o Polo de Santa Gertrudes no Estado de São Paulo.

A rota tecnológica da via seca apresenta-se menos intensiva no consumo de energia térmica e elétrica.

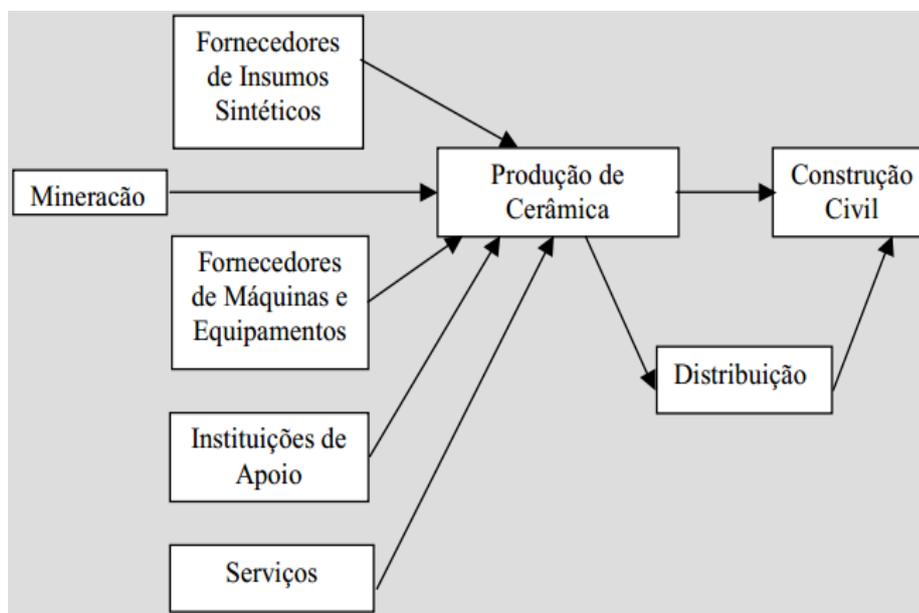


Figura 1- Cadeia produtiva do segmento industrial de revestimentos cerâmicos

Fonte: Berni, Bajay e Gorla (2010).

Os revestimentos obtidos por via úmida são de base preferencialmente de cor clara, formulados com massa composta, constituída de misturas de matérias-primas minerais que reúnem os materiais fundentes, inertes e formadores de vidro.

Essa mistura é moída e homogeneizada em moinhos de bola, em meio aquoso; seca e granulada em spray dryer ou atomizador. No Brasil, a produção de revestimentos via úmida está concentrada em Criciúma (SC), e, secundariamente, em Mogi Guaçu e Grande São Paulo (SP).

Conforme MME (2015), a indústria nacional, está constituída essencialmente por capital nacional, é integrada por 93 empresas com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul, e em expansão no Nordeste, gerando cerca de 25 mil postos de trabalho diretos e em torno de 200 mil indiretos, ao longo de sua cadeia produtiva.

2 | CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA

O setor cerâmico é responsável por aproximadamente 11,5 % do consumo total de energia no setor industrial brasileiro (BEN, 2019) (44.327 103 tEP). As principais fontes de energia utilizadas pelo setor cerâmico estão apresentadas na Tabela 1. As participações da lenha e gás natural (GN) são as mais representativas, com destaque para o GN no segmento de revestimentos cerâmicos.

FONTES	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
LENHA	50,4	50,7	50,4	51,2	51,9	52,3	50,1	48,7	48,6	49,3
GÁS NATURAL	23,7	25,4	27,5	27,4	26,7	26,4	28,7	31,0	31,0	29,8
ÓLEO COMBUSTÍVEL	7,8	6,6	2,6	2,3	2,5	2,0	1,3	1,1	1,3	1,3
ELETRICIDADE	7,3	7,1	7,2	7,5	7,5	7,4	7,3	7,5	7,5	7,6
OUTRAS	10,8	10,1	12,3	11,6	11,4	11,9	12,6	11,6	11,5	12,0

Tabela 1: Setor Cerâmico, Consumo Final por Fonte de Energia, em %

Fonte: BEN, 2019

Especificamente em relação ao segmento de revestimentos cerâmicos, conta, basicamente, em sua matriz energética com o consumo de gás (essencialmente gás natural) no processo de combustão para atomização, secagem e queima, e energia elétrica como força motriz.

A Tabela 2 apresenta o consumo anual de energia, individualizando por tipo de processo. A rota Via Úmida é mais intensiva no consumo energético.

Consumo de Energia Anual	Processo		Total/Mês
	“Via Seca” + Extrudado	“Via Úmida” + Porcelanato	
Gás Natural (m ³)	520.158.095	548.032.072	1.068.190.176
Energia Elétrica (kwh)	638.874.118	664.218.272	1.348.092.390

Tabela 2: Consumo energético no segmento de revestimentos cerâmicos.

Fonte: Cabral Junior et al, 2010

A Tabela 3 relaciona os indicadores de consumo energético por uso final no caso da energia térmica.

	Consumo GN Atomização (m ³ .m ⁻²)	Consumo GN Secagem (m ³ .m ⁻²)	Consumo GN Queima (m ³ .m ⁻²)	Consumo Total GN (m ³ .m ⁻²)	Consumo Energia Elétrica (kwh.m ⁻²)
Via Seca	--	0,27	0,76	1,03	1,36
Via Úmida	0,8	0,26	1,2	2,26	2,74
Índice Nacional	0,8	0,27	0,9	1,43	1,81

Tabela 3: Consumo energético no segmento de revestimentos cerâmicos

Fonte: Cabral Junior et al, 2010

Pelos valores computados por Cabral Junior et al (2010), o consumo de GN varia de 1,03 m³/m² (via seca) a 2,26 m³/m² (via úmida), com a média nacional em 2008 de 1,43 m³/m² (85,08 m³/t). Os consumos específicos para energia elétrica variam de 1,36 Kwh/m² (via seca) a 2,74 Kwh/m² (via úmida), com a média situando em 1,81 Kwh/m². Convertendo os consumos médios (térmico e elétrico) para equivalentes em kcal, chega-se aos seguintes valores: para o consumo térmico (GN) o valor de 791.244 kcal/t e para o elétrico de 92,66 kcal/t, totalizando 791.337 kcal/t, o que corresponde ao consumo de 0,079 tep/t de revestimentos produzidos (mínimo de 0,057 tep/t e máximo de 0,125 tep/t).

3 | COMPARAÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA: BRASIL X ESPANHA

A fim de se comparar, entre países, a intensidade energética do segmento de revestimento cerâmico, foi necessária uma adaptação da metodologia proposta pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2007). Esta metodologia, que requer o cálculo de um índice de eficiência energética IEE), está descrita a seguir:

1) Levantamento do consumo energético final para o segmento e/ou usos finais importantes. Neste estudo caso foi considerado a atomização, secagem e a queima. Estatísticas da Agência Internacional de Energia (AIE) pode ser utilizada para os outros países.

2) Adota-se valores de consumo energético específico definidos pela AIE para a melhor tecnologia disponível (MTD). Neste trabalho, comparações foram realizadas com o consumo específico apresentado nos estudos da AVEN (2008) e AVEN (2010) e dados de campo de Cabral Junior (2010).

3) Valores de consumo energético prático mínimo são obtidos multiplicando-se os volumes de produção pelos consumos energéticos específicos correspondentes da MTD.

4) Obtém-se o índice de eficiência energética (IEE) dividindo-se o consumo energético prático mínimo pelo consumo energético real (energia final).

5) Calcula-se: Potencial de melhoria = Um – Índice de eficiência energética.

O IEE de um país ou região seria “1” se a energia utilizada para produzir suas “commodities” fosse a mesma requerida pela MTD. Valores bem abaixo de 1 indicam que o

consumo de energia é superior ao da MTD e que existe uma oportunidade para uma maior eficiência energética se a MTD for adotada.

A AIE indica que calor e a eletricidade devam ser tratados separadamente para permitir análises envolvendo a cogeração. Os valores de consumo de calor em cada país são estimados com base no consumo declarado de combustíveis na indústria, assumindo-se uma eficiência de conversão de 80%.

Devido as dificuldades de obtenção dados e informações do consumo energético das MTD no segmento de revestimentos cerâmicos, optou-se por calcular o potencial técnico de eficiência energética.

A Tabela 4 mostra os consumos médios considerados no levantamento do potencial de eficiência no segmento brasileiro tendo-se como balizador consumos médios publicados pela AVEN. Estudo de campo na região de Mogi Guaçu, no momento vem fazendo os levantamentos de consumo de energia térmica e elétrica com vistas a aplicação da metodologia proposta pela AIE.

A Tabela 4 revela, para o segmento de revestimentos cerâmicos brasileiro, que:

(i) a eficiência no uso da energia elétrica é muito maior que a eficiência no uso do calor; demonstrado pelo potencial técnico, e

(ii) o incremento no uso de GN, quer seja na cogeração ou no uso atual, merece aprofundamento de estudos para a racionalização energética na secagem e atomização, seguido da queima em face do menor potencial técnico.

País	Energia Térmica (GN)			Energia Elétrica (kWh/t)
	(kWh/t)			
	Atomização	Secagem	Queima	Força Motriz
Brasil (1)	678,0	227,0	756,0	139,2
Espanha (2)	470,0	60,0	722,0	212,6
Potencial (%)	44	278	4,7	(34)
$[(1)/(2) - 1] * 100$				

Obs: 1 m² = 13 kg (MME, 2015)

Gás natural - 1 m³ = 10,932 kWh (BEN, 2019)

Tabela 4: Potencial Técnico e Consumo específico médio de Brasil e Espanha.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista da evolução da demanda do setor cerâmico, a conjuntura de expansão da economia e a ampliação do poder de compra das classes C e D refletiu-se fortemente no mercado da indústria de cerâmica nos últimos. A construção civil, principal consumidora dos produtos cerâmicos, por ora teve uma desaceleração opor conta da crise econômica, mas é antevisto que para o médio e longo prazos virá a recuperação da atividade econômica, sendo materializada de forma lenta e gradual. No longo prazo, o significativo déficit habitacional

existente no País aponta para a necessidade da implementação de medidas que visem ao equacionamento desse déficit, o que contribuiria para uma expansão considerável da demanda por produtos dos segmentos de revestimentos cerâmicos.

A expectativa para o segmento brasileiro de revestimentos cerâmicos é de crescimento sustentado das vendas internas e das exportações, consolidando-se como o 2º maior produtor mundial em volume. Para os outros produtos tradicionais brasileiros (prensados via seca e via úmida), a expectativa é de continuidade da expansão da produção, ancorada tanto no mercado doméstico, ainda que em taxas de crescimento menos expressivas que na década passada, como também no mercado internacional.

Diante desta situação conjuntural, a cogeração poderá ganhar espaço visto seu poder de aumentar significativamente a eficiência de conversão de alguns energéticos, passíveis de utilização no segmento de revestimentos cerâmicos. Este é caso do gás natural, ao mesmo tempo que reduz as emissões globais e os custos de operação. Esta tecnologia ainda é marginal neste segmento, mas diante das perspectivas de ampliar a oferta de forma descentralizada e do desenvolvimento de turbinas a gás de elevados rendimentos térmicos e razoável economicidade em potências da ordem de alguns MW, permite considerar sua utilização no segmento de revestimentos cerâmicos. Em uma situação de médio e longo prazos, estudos de pré-viabilidade da adoção de uma turbina a gás em uma planta de cerâmica de revestimento, gerando energia elétrica e empregando os gases quentes do escape no processo de secagem em atomizador, deve ser um objetivo a perseguir. No tocante as emissões de GEE, a penetração de gás natural deslocando outras fontes de energia de origem fóssil na matriz energética, aliado ao reaproveitamento de resíduos de processo, deverão contribuir para o segmento entrar na chamada economia circular.

AGRADECIMENTOS

Ao NIPE pelo apoio técnico e logístico, a PRP-UNICAMP e a EDUCORP pelo apoio financeiro e institucional.

REFERÊNCIAS

AVEN, Agência Valenciana de Energia, Estudio energético sector de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana, Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio/IDAE y la Comunidad Autónoma.”, 2008, 49 p.

AVEN, Agência Valenciana de Energia, Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas”, Instituto de tecnología Cerámica (ITC), ASCER, Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos: Eliseo Monfort, Ana Mezquita, Gustavo Mallol, Rocio Granel y Eva Vaquer, Calle Colón, 1, 4ª planta, Valencia, 2010, 245 p.

BEN, Balanço Energético Nacional: Ano Base 2018. Empresa de Pesquisa Energética, EPE; Ministério de Minas e Energia, MME. EPE/MME. Rio de Janeiro, 2019. 291p.

BERNI, M. D., BAJAY, S. V. e GORLA, F. D., Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Relatório setorial: Setor Cerâmico, Confederação Nacional da Indústria – CNI e Procel Indústria / Eletrobras, Brasília, DF, 2010, 75p.

CABRAL JUNIOR, M. BOSCHI, A. O., MOTTA J.F.M., et al , Panorama e Perspectivas da Indústria de Revestimentos Cerâmicos no Brasil, Revista Cerâmica Industrial, 15, (3), Maio/Junho, 2010.

IEA, Indicators for Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions – A Technology Perspectives (Draft 9/2/2007), International Energy Agency (IEA), Paris, 2007.

MME, Ministério de Minas e Energia Secretaria de Geologia, ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR DE TRANSFORMAÇÃO DE NÃO METÁLICOS Mineração e Transformação Mineral Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, 2015, 116 p.

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO EM BORDA DE COMPÓSITOS

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 02/05/2020

João Pedro Inácio Varela

Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande – Paraíba

Joseph Bruno Rodrigues Almeida

Universidade Federal de Campina Grande
Petrolina – Pernambuco

<http://lattes.cnpq.br/5066226532466874>

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande – Paraíba

<http://lattes.cnpq.br/8131607733881361>

RESUMO: O impacto acidental em compósitos laminados durante a fabricação ou em serviço pode ocorrer em diferentes regiões desse material, como na parte central (*central impact*), proximidades da borda (*near edge impact*) e/ou até a própria borda (*on edge impact*). O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo para realizar ensaios de impacto por queda de peso em bordas de materiais compósitos e analisar o comportamento dos danos. Foram realizados estudos específicos sobre materiais compósitos e impactos em borda de compósitos laminados, onde através

desses estudos e de um levantamento do estado da arte para saber como são projetados os diversos dispositivos para impacto na borda por queda de peso. Foi concebido, fabricado e testado um dispositivo de simples construção. Nos testes foram utilizados compósitos de fibra de vidro com 12 camadas submetidas a impacto por queda de peso em cinco níveis de energia distribuídos entre 20J e 95J. Como resultados, foram avaliadas a eficácia do dispositivo e os tipos de falhas em materiais compósitos por impacto de baixa velocidade na borda.

PALAVRAS-CHAVE: materiais compósitos, impacto na borda, ensaio de impacto por queda de peso.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR DROP-WEIGHT IMPACT TESTING ON EDGE OF COMPOSITES

ABSTRACT: Accidental impact on laminated composites during manufacture or in service can occur in different regions of the material, as in the center, near edge or even on edge. The aim of this work is the development and test of a drop weight impact testing device for edge of composite materials and to analyze the damage behavior. Specific studies were carried out on composite materials and

impacts on the edge of laminated composites, that through these studies and a survey of the state of the art to know how drop weight impact testing devices are designed. A simple construction device has been designed, manufactured and tested. In the tests, twelve glass fibre plies were subjected to drop-weight impact in five energy levels between 20J and 95J. As results, it has been evaluated the device's efficiency and failure types by low velocity impact in the edge of composite materials.

KEYWORDS: composite materials, edge impact, drop-weight impact testing.

1 | INTRODUÇÃO

Materiais compósitos laminados são usados em aplicações estruturais mais complexas onde bordas e recortes são inevitáveis. Estas aplicações incluem fuselagens de avião militar e civil, novas aplicações aeroespaciais, bem como painéis automotivos e estruturas críticas. Partes de estruturas compósitas são particularmente vulneráveis aos impactos, incluindo perto da borda de uma porta de inspeção ou outra abertura (MALHOTRA et al., 2008).

Um problema prático ao qual os compósitos estão sujeitos, e extremamente importante para o desempenho seguro desses materiais nas suas diversas aplicações, está ligado ao dano produzido por impacto de baixa energia. Nesses eventos, o compósito pode não apresentar defeito externo de fácil detecção e assim, eventuais danos estruturais ocasionados pelo impacto podem passar despercebidos. Um exemplo típico de impacto de baixa energia sobre uma estrutura fabricada com materiais compósitos são os pedriscos jogados pelas rodas de um aeroplano sobre sua fuselagem, durante as operações de pouso, decolagem e taxiamento. O material submetido a repetidos impactos de baixa energia pode vir eventualmente a falhar em serviço, embora seu aspecto externo não esteja seriamente comprometido (ALMEIDA; MORAIS; 2001). Esses danos por impacto também podem ocorrer durante os processos de fabricação e transporte do equipamento em questão, queda de ferramentas ou detritos, dentre outros. Danos decorrentes de tais eventos podem reduzir consideravelmente a resistência e rigidez dessas estruturas (CANTWELL & MORTON, 1991).

Portanto, o objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo para realizar ensaios de impacto por queda de peso em bordas de materiais compósitos e analisar o comportamento dos danos.

2 | IMPACTO EM BORDA DE COMPÓSITOS

A Figura 1 (a) apresenta um impacto ao longo da espessura da alma de uma viga em T, enquanto a 1 (b) mostra um impacto na borda de uma viga em I. A Figura 2 apresenta impactos na parte central (*central impact*), proximidades da borda (*near edge impact*) e na própria borda (*on edge impact*) de painéis compósitos. O enfoque deste trabalho está no estudo desse último caso de impacto citado.

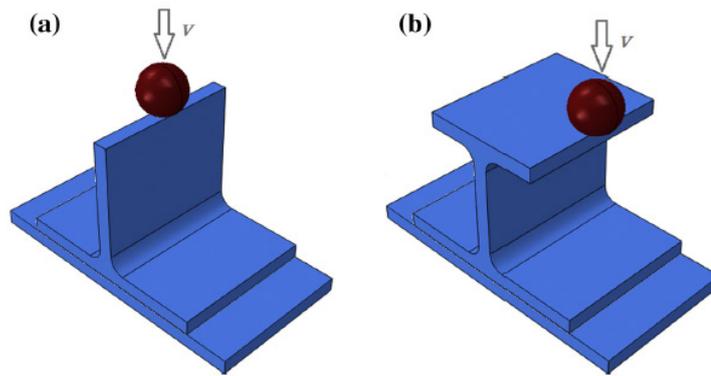


Figura 1: impacto: (a) ao longo da espessura da alma de viga em T; (b) na borda de uma viga em I.

Fonte: LI & CHEN (2016).

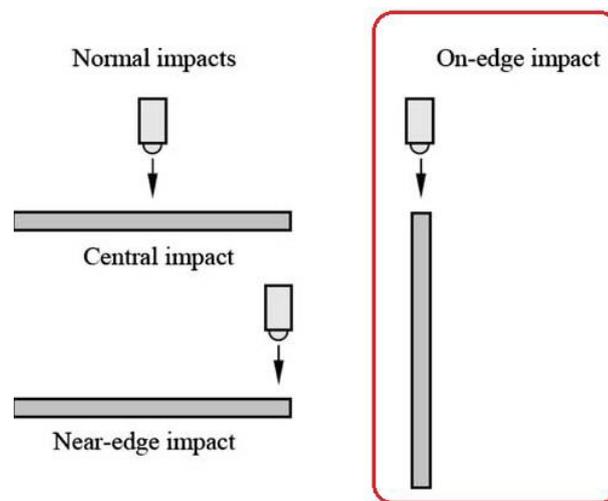


Figura 2: possíveis regiões de impacto.

Fonte: MALHOTRA et al. (2008).

Uma das metodologias usadas para o estudo do impacto nas proximidades da borda e/ou na própria borda de uma estrutura compósita consiste na adaptação de um dispositivo especial em uma máquina de ensaio por queda de peso (*drop weight testing machine*), Figura 3.

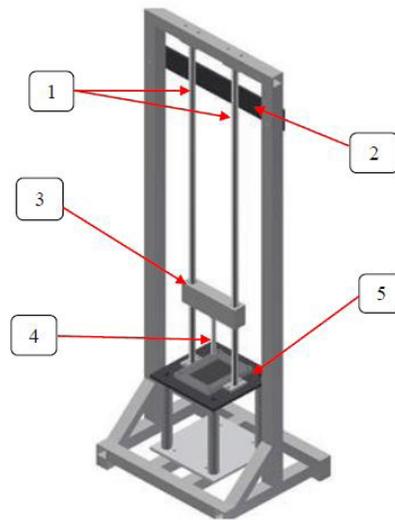


Figura 3: máquina de ensaio por queda de peso utilizada nos testes de impacto, composta dos seguintes componentes estruturais: (1) mecanismo de guias; (2) mecanismo de travamento; (3) peso associado a um fixador para o impactador; (4) impactador; (5) base para a amostra.

Fonte: GALDINO JÚNIOR (2014).

Alguns trabalhos científicos que fazem uso dessa metodologia foram encontrados e são apresentados a seguir.

A Figura 4 apresenta a metodologia usada por MALHOTRA et al. (2008): o dispositivo desenvolvido possui uma parede fixa ao suporte metálico (acoplado à máquina) e outra móvel, que se ajusta de acordo com a espessura da amostra. O corpo de prova é um laminado epóxi reforçado com fibra de vidro, que apresenta como resultado a zona de dano causada pelo impacto na borda, visto na Figura 5 (a), bem como a presença de delaminações, na Figura 5 (b).

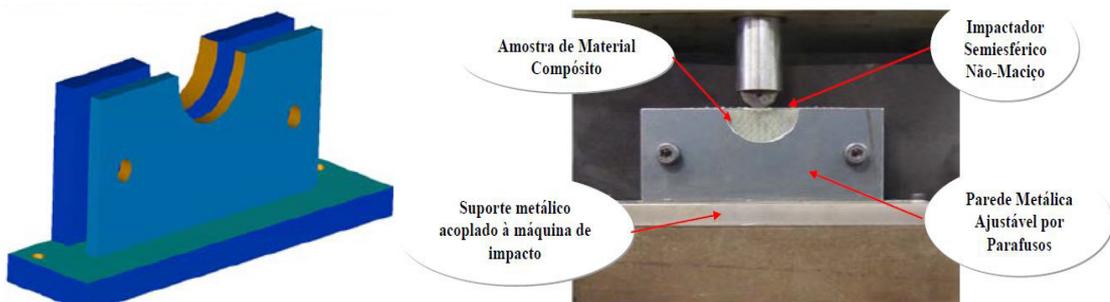


Figura 4: dispositivo adaptado à máquina *CEATIS Dartvis 6790*.

Fonte: MALHOTRA et al. (2008).

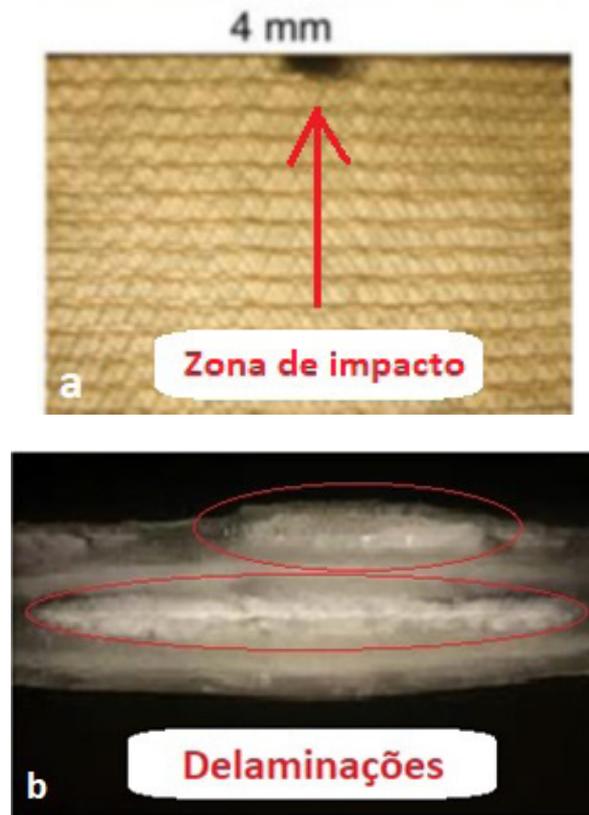


Figura 5: (a) zona de dano no compósito de 4 mm; (b) delaminações na fibra do compósito.

Fonte: MALHOTRA et al. (2008).

A Figura 6 apresenta a metodologia usada por OSTRE et al. (2014): esse dispositivo é composto por um suporte de aço e um calço/apoio que permite que a amostra permaneça travada a pressão constante, além de proporcionar o impacto com queda de peso específico a uma altura definida. Ensaando um compósito de camadas de fibra de carbono pré impregnadas T/700/M21 UD, obteve-se delaminações ao longo da borda impactada, apresentado na Figura 7 (a), trincas internas, Figura 7 (b), e falhas interlaminares, Figura 7 (c).

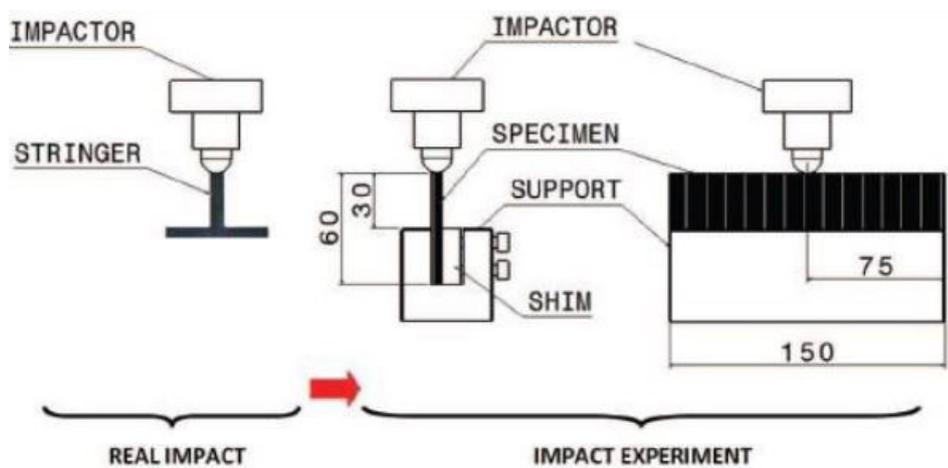


Figura 6: dispositivo adaptado à máquina 100kN INSTRON 4206.

Fonte: OSTRE et al. (2014).

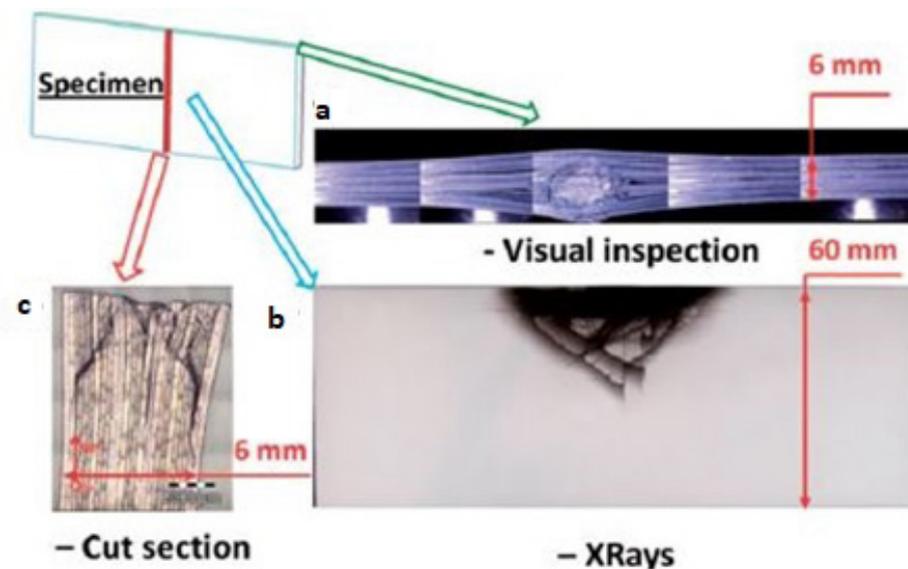


Figura 7: (a) delaminações ao longo da borda impactada; (b) trincas internas; (c) falhas interlaminares.

Fonte: OSTRE et al. (2014).

A Figura 8 apresenta a metodologia usada por RHEAD et al. (2009): nesse dispositivo, a chapa a ser ensaiada foi parafusada à uma placa de suporte de aço (que é presa à máquina) buscando simular condições reais e prevenir vibrações no impacto. A amostra da chapa utilizada é o CFRP (compósito de fibra de carbono) e apresenta uma região semielíptica (na Figura 9, região de cor vermelha), representando uma flambagem localizada devido a delaminação.

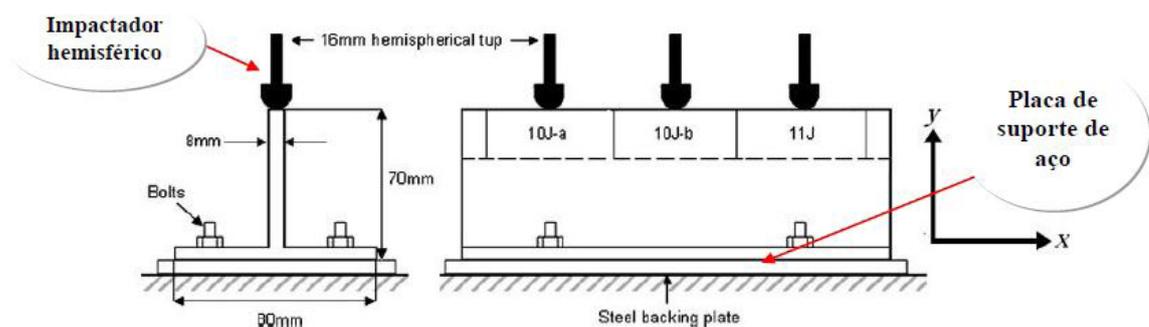


Figura 8: dispositivo adaptado à máquina Instron Dynatup 9250HV.

Fonte: RHEAD et al. (2009).

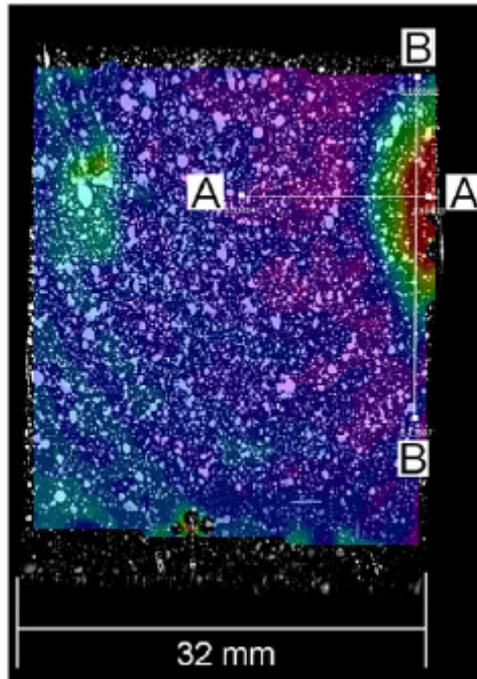


Figura 9: região semielíptica mais avermelhada, mostrando flambagem localizada devido a delaminação.

Fonte: RHEAD et al. (2009).

3 | METODOLOGIA

A metodologia de projeto utilizada no presente trabalho é dividida basicamente em cinco fases, que são mostradas e descritas no fluxograma da Figura 10.

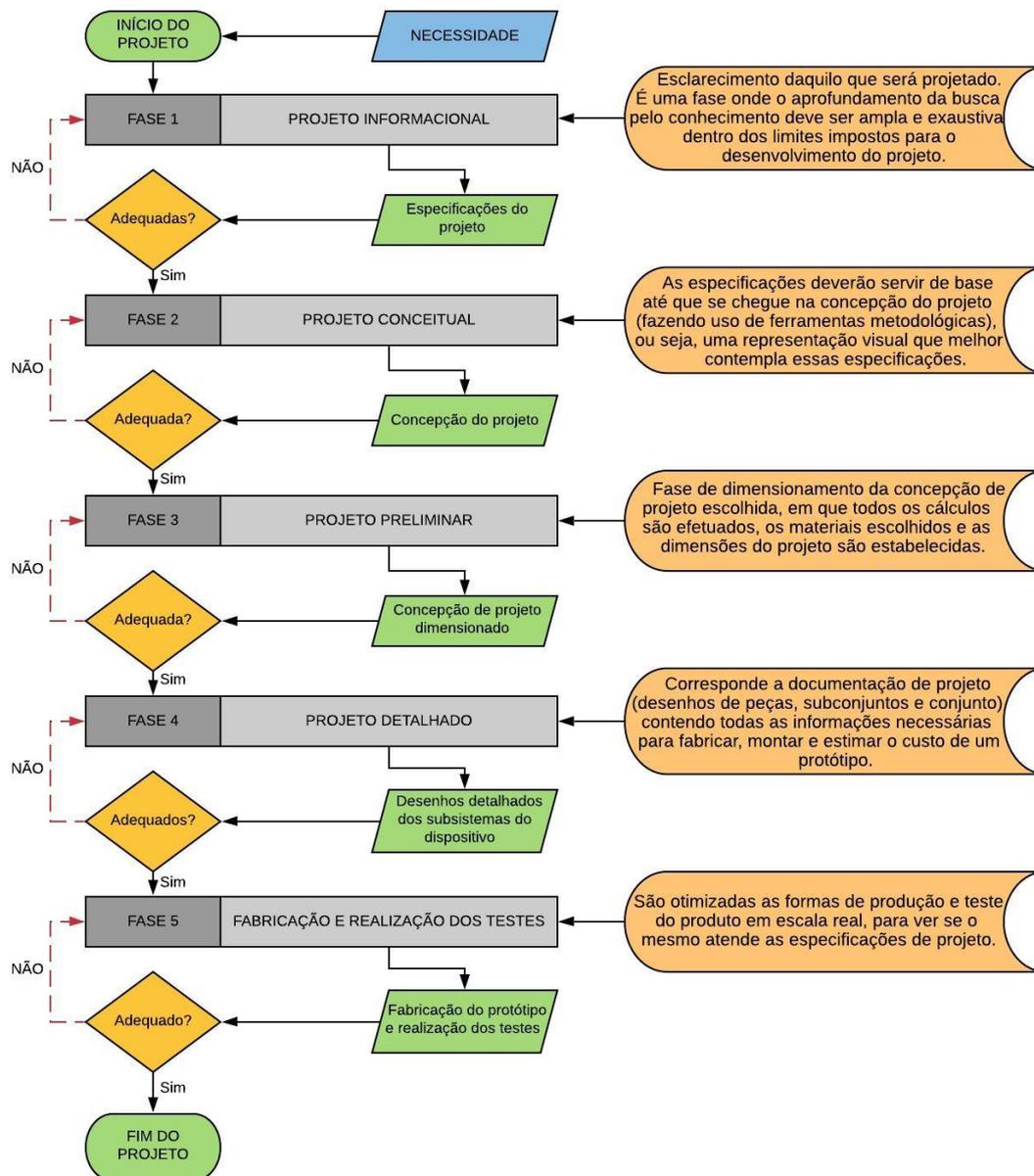


Figura 10: fluxograma da metodologia de projeto adotada.

Fonte: Adaptado (MARIBONDO, 2000).

3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Baseando-se nas pesquisas encontradas a respeito de dispositivos para ensaios de impacto por queda de peso em bordas de compósitos, os mesmos foram postos em uma matriz morfológica (Figura 11) como princípios de solução para o dispositivo a ser projetado.

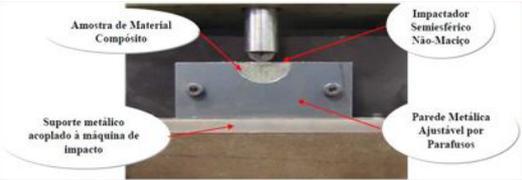
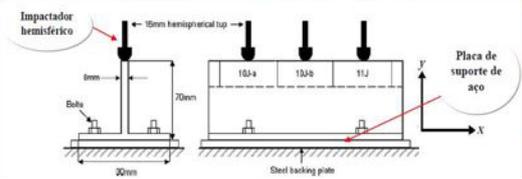
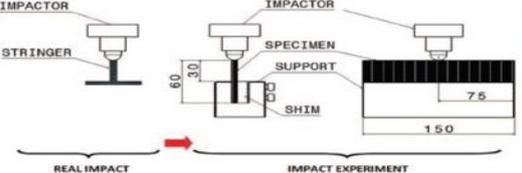
<p>MALHOTRA et al. (2008).</p>		<p>A amostra fica totalmente restrita entre as paredes com apenas uma abertura semicircular, com raio de 20mm, na região onde ocorre o impacto. O dispositivo é composto de uma parte fixa à máquina (parede interna) e outra móvel, acoplada a uma base e ajustável através de parafusos, o que possibilita a utilização de amostras de espessuras variadas. O impactador tem forma semiesférica não-maciça, com raio de 7mm, e uma haste de 15mm de comprimento que garante um impacto coerente em toda a borda.</p>
<p>RHEAD et al. (2009).</p>		<p>Utilizado como método analítico de compressão após impacto (CAI). Não foi utilizada nenhuma espécie de garra. Para simular condições de fronteira semelhantes aos encontrados em aplicações reais e para impedir excessivas vibrações durante o impacto, o reforço foi aparafusado a uma placa de suporte de aço. Além disso, para garantir que apenas um único impacto da energia conhecida foi entregue, um mecanismo pneumático de anti-rebote foi usado para interceptar o impactador após o primeiro impacto.</p>
<p>OSTRE et al. (2014).</p>		<p>Desenvolvido com o intuito de realizar testes de impacto e de compressão após impacto. Como não existe norma ou um tipo de dispositivo padrão para este tipo de ensaio, uma configuração original foi desenvolvida. O dispositivo projetado é composto por um suporte de aço e um calço/apoio que permite que a amostra permaneça travada a pressão constante. Além disso, proporciona o impacto de uma queda de peso específico a uma altura definida.</p>

Figura 11: matriz morfológica dos dispositivos encontrados na pesquisa acadêmica.

Fonte: autoria própria.

Sendo assim, o modelo de referência adotado para concepção do dispositivo de ensaio de impacto por queda de peso em bordas de materiais compósitos foi o dispositivo desenvolvido em MALHOTRA et al. (2008), por ser de fácil construção, baixo custo e configuração simples.

Fazendo uso do software Autodesk Inventor (versão estudante), chega-se ao conceito do dispositivo para ensaio de impacto em bordas de compósitos (Figura 12), composto por três subsistemas (Figura 13).

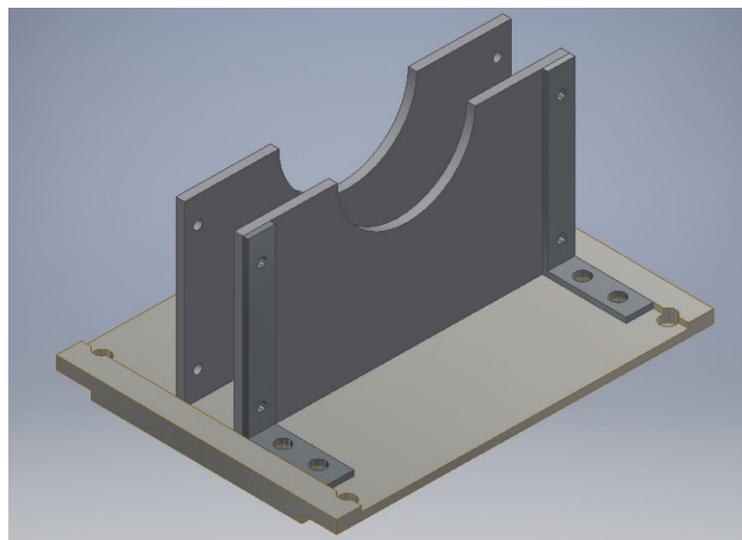


Figura 12: concepção do dispositivo para ensaio de impacto.

Fonte: autoria própria.

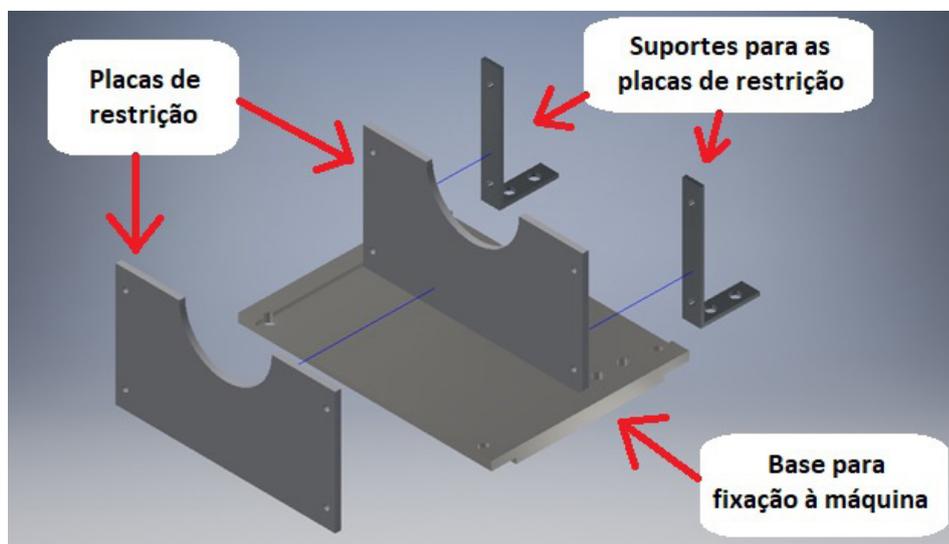


Figura 13: subsistemas do dispositivo.

Fonte: autoria própria.

Se tratando das dimensões do dispositivo, as mesmas podem ser vistas no projeto detalhado, a partir da folha técnica (Figura 14) e ainda, em relação ao material, todas as peças foram fabricadas em aço carbono SAE 1020.

Com os respectivos desenhos e instruções de fabricação, realiza-se o processo de fabricação do dispositivo de impacto por queda de peso em bordas de materiais compósitos. A Figura 15 (a) mostra todas as peças do dispositivo projetado, enquanto a Figura 15 (b) apresenta o dispositivo montado e pronto para o uso.

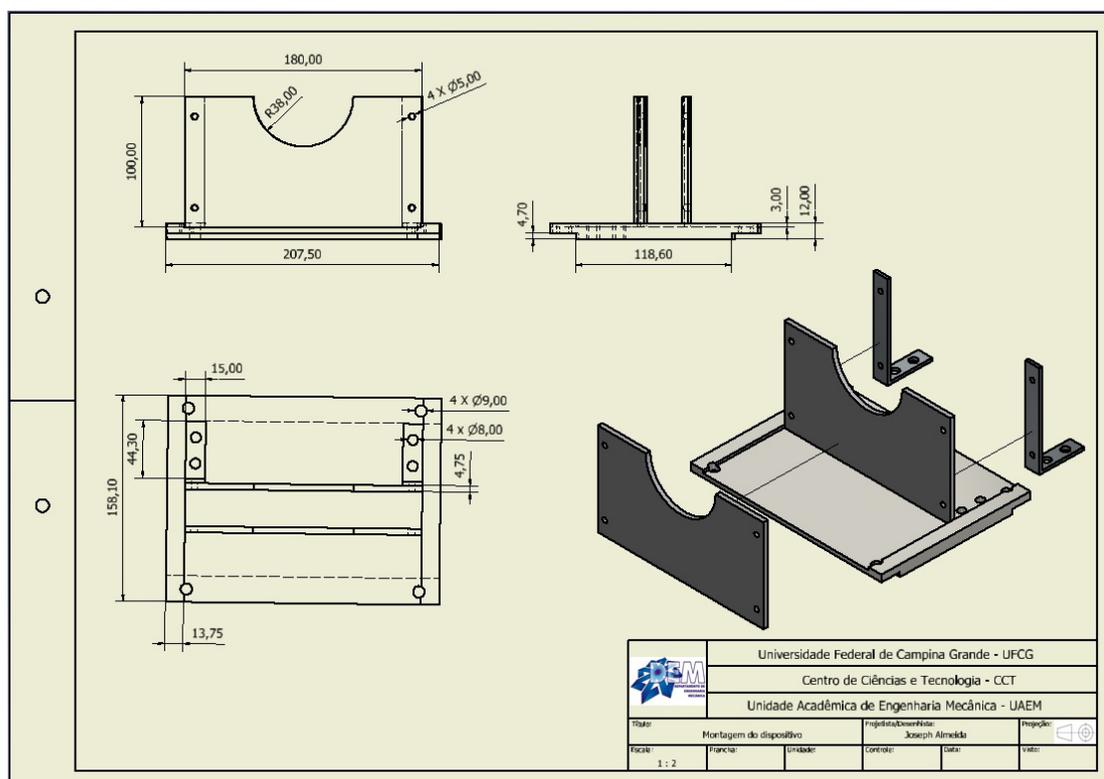


Figura 14: projeto detalhado do dispositivo.

Fonte: autoria própria.

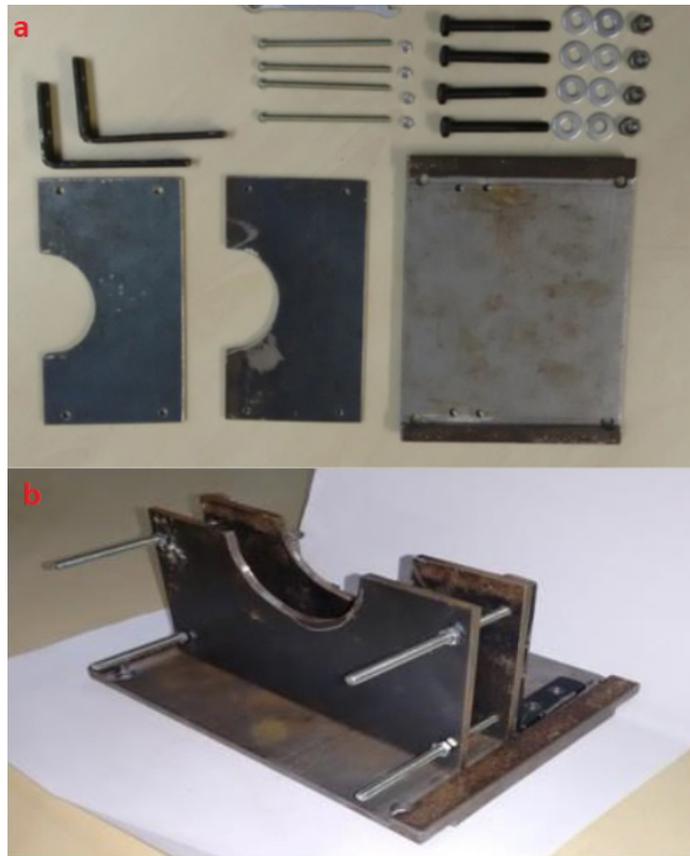


Figura 15: dispositivo: (a) desmontado; (b) montado.

Fonte: autoria própria.

Os testes foram realizados em uma máquina de ensaio por queda de peso, mostrada na Figura 16 (a), em corpos de prova com 12 camadas de manta de fibra de vidro, Figura 16 (b). A energia de impacto disponível para realizar os testes variava entre 20 e 95J. Para a escolha do nível de energia a ser utilizado na realização dos testes levou-se em consideração a espessura da placa e a experiência do autor. Assim, decidiu-se escolher o nível de 38J.

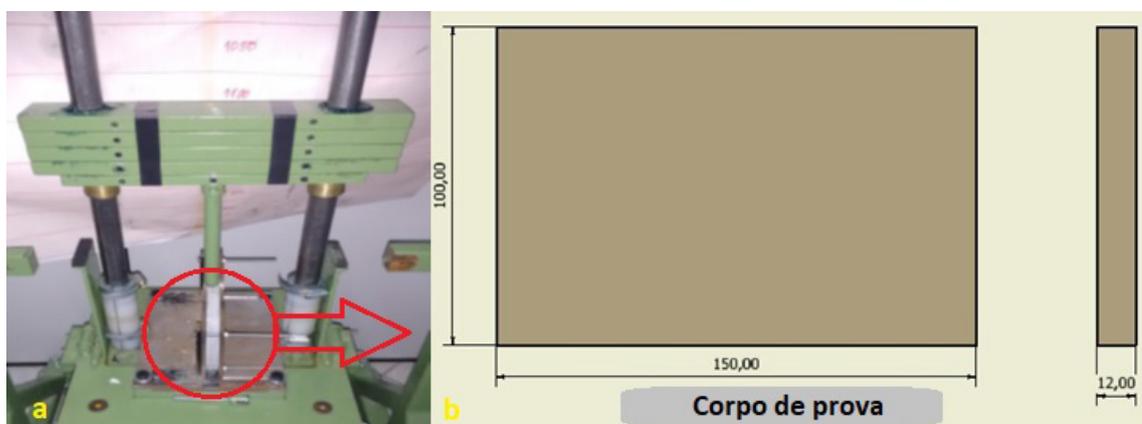


Figura 16: (a) dispositivo de ensaio acoplado à máquina de impacto; (b) corpo de prova utilizado e suas dimensões.

Fonte: autoria própria.



Figura 17: dispositivo de ensaio acoplado à máquina de impacto.

Fonte: autoria própria.

A Figura 18 (a) apresenta as delaminações que foram geradas no ensaio de impacto feito com o dispositivo projetado neste trabalho, além do dano do impacto na borda do compósito. Danos semelhantes foram obtidos por OSTRE et al. (2014), Figura 18 (b).

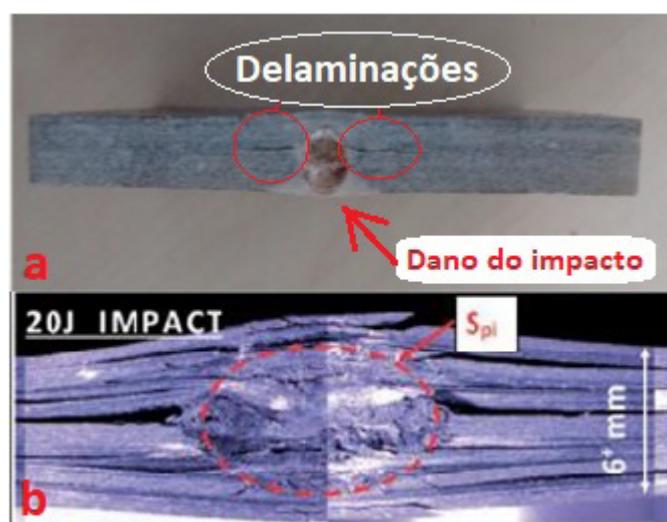


Figura 18: danos causados pelo impacto: (a) no estudo em questão; (b) OSTRE et al., 2014.

Fonte: autoria própria.

Além disso, outro tipo de dano que pode ser visto na região lateral dos compósitos ensaiados, Figuras 19 (a) e 19 (b). Segundo (RHEAD, 2009), essa descoloração em formato semi-elíptico é produzida após um impacto a baixa velocidade na borda de um compósito, sendo uma região delaminada.

Dano com formato semielíptico semelhante aos encontrados nos compósitos ensaiados nesse trabalho foram também obtidos por MALHOTRA et al. (2008), Figura 20.

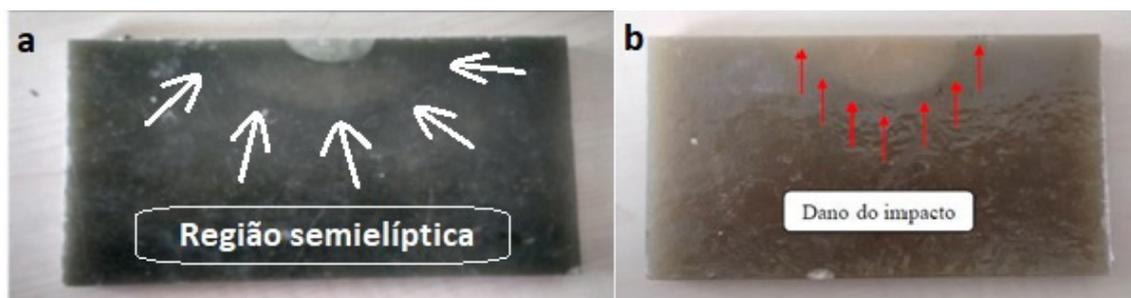


Figura 19: região semielíptica de delaminação em duas amostras.

Fonte: autoria própria.



Figura 20: região semielíptica em MALHOTRA et al. (2008).

Fonte: MALHOTRA et al. (2008).

4 | CONCLUSÃO

Foi desenvolvido e testado com sucesso um dispositivo para ensaios de impacto em bordas de compósitos adaptado a máquinas de ensaios por queda de peso (*drop test*).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que contribui constantemente para o desenvolvimento nacional e o reconhecimento das instituições de pesquisa e pesquisadores brasileiros pela comunidade científica internacional.

REFERÊNCIAS

ABRATE, S. **Impact Engineering of Composite Structures**, v.526, pp. 104-132, 2005.

BAERE, I., PAEPEGEM, W. V., AND DEGRIECK J., **The Use of Rivets for Electrical Resistance Measurement on Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics**. *Smart Materials and Structures*, Vol 16, pp.1821–1828. 2007.

CALLISTER JR., WILLIAM D. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: John Wiley and Sons, 2002.

CANTWELL, W.J.; MORTON, J. **The impact resistance of composites- a review**. *Composites*. v.22, n.5, pp. 347-362, 1991.

DAVIES, G., OLSSON, R. (2004). **Impact on composite structures**. *The Aeronautical Journal* (1968), 108 (1089), 541-563.

GALDINO JUNIOR, F. **Desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

LI, NIAN & CHEN, Puhui. (2015). **Experimental investigation on edge impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behavior of stiffened composite panels**. *Composite Structures*. 138. 10.1016/j.compstruct.2015.11.060.

MALHOTRA, A., GUILD, F.J., **Impact damage to composite laminates: effect of impact location**. *Appl Compos Mater* 2014; 21:165-177.

MALHOTRA, A., GUILD, F.J., PAVIER, M.J., **Edge impact to composite laminates: experiments and simulations**. *J Mater Science* 2008; 43:6661-7.

MORAIS, W. A. de; D'ALMEIDA, J. R. M.; GODEFROID, L. B. **Efeito de impactos repetidos de baixa energia em compósitos pultrudados**. *Polímeros*, v. 11, p. 27-34, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v11n1/v11n1a06.pdf>>.

OSTRÉ, B., BOUVET, C., LACHAUD, F., MINOT, C., ABOISSIÈRE, J., **Edge impact damage scenario on stiffened composite structure**. (2014) *Journal of Composite Materials*. ISSN 0021-9983.

POTTER, K., **An introduction to composite products: Design, development and manufacture**. Springer-Verlag, Chapman & Hall, New York, United States, 1-38 p. 1997.

RHEAD, A.T., MARCHANT, D., BUTLER, R.: **Compressive strength of composite laminates following free edge impact**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41, 1056-1065, 2010.

ROMARIZ, L. A., **Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PRODUÇÃO DE FOTOCATALISADORES UTILIZANDO CINZAS RESIDUAIS

Data de aceite: 19/06/2020

Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Química
Maringá – Paraná

Aline Domingues Gomes

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Química
Maringá – Paraná

Lucas de Souza Borban

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Química
Maringá – Paraná

Jean César Marinozi Vicentini

Universidade Estadual de Maringá,
Departamento de Engenharia Química
Maringá – Paraná

RESUMO: A destinação de resíduos agrícolas é uma preocupação econômica e ambiental a qual o Brasil, um dos maiores produtores agrícolas do mundo, deve dar atenção especial. Semelhantemente, a indústria têxtil é um importante segmento de evidente poluição devido seus efluentes líquidos. Dentre as diferentes oportunidades em bioenergia, acreditando ser capaz de contribuir para minimização de ambos

os problemas, o presente artigo explorou a utilização de cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima para síntese de zeólitas e conseqüentemente produção de fotocatalisadores ativos na degradação de corante da indústria têxtil. A síntese da zeólita seguiu método da fusão alcalina e os fotocatalisadores foram produzidos com 2,5 e 5% (m/m) e ZnO e 5 e 10% (m/m) de TiO_2 e caracterizados por análise textural, difração de raios-X, ponto de carga nulo e espectroscopia de fotoacústica comprovando a necessidade de radiação UV para melhor eficiência fotocatalítica. O melhor catalisador a ser impregnado e utilizado na degradação do corante RB-250 é o 5% em peso, em reação sem bulbo protetor. Desta forma, a utilização de cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar é uma alternativa sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: síntese zeólita A; semicondutores; fotocatalise; corantes.

ABSTRACT: The destination of agricultural waste is an economic and environmental concern to which Brazil, one of the largest agricultural producers in the world, should pay special attention. Similarly, the textile industry is an important segment of evident pollution due to its liquid effluents. Among

the different opportunities in bioenergy, believing to be able to contribute to the minimization of both problems, this article explored the use of ash from the burning of sugarcane bagasse as a raw material for the synthesis of zeolites and consequently production of photocatalysts active in the dye degradation of the textile industry. The synthesis of the zeolite followed the alkaline fusion method and the photocatalysts were produced with 2.5 and 5% (m / m) and ZnO and 5 and 10% (m / m) of TiO₂ and characterized by textural analysis, X-ray diffraction, zero charge point and photoacoustic spectroscopy proving the need for UV radiation for better photocatalytic efficiency. The best catalyst to be impregnated and used in the degradation of the RB-250 dye is 5% by weight, in reaction without a protective bulb. Thus, the use of ash from the burning of sugarcane bagasse is a sustainable alternative.

KEYWORDS: zeolite A synthesis; semiconductors; photocatalysis; dyes.

1 | INTRODUÇÃO

As cinzas são resíduos sólidos provenientes da queima da biomassa na produção de energia. As fontes mais comuns dessas biomassas são a cana-de-açúcar, casca de arroz e resíduos da indústria madeireira, papel e celulose. Na extração do caldo de cana-de-açúcar é gerado grande quantidade de bagaço, cerca de 30% da cana moída. De acordo com o CONAB, (2017) cada tonelada de cana-de-açúcar processada gera de 250 a 270 kg de bagaço, cuja queima resulta em 1% a 4% de cinzas. Nos últimos anos a produção de cinzas no Brasil permaneceu na média de três milhões de toneladas (FONSECA & HANISCH, 2018; ROHDE & MACHADO, 2016; SESSA, 2013; VASCONCELOS, 2010).

Aproximadamente 95% de todo o bagaço produzido no Brasil é queimado em caldeiras para geração de vapor. (ANDREOLA e SANTOS, 2011). Entretanto, devido ao baixo valor agregado e o alto custo para o transporte, às indústrias acabam armazenando esse material (FUNGARO e BRUNO, 2009) que normalmente é produzido em grande escala e, conseqüentemente, acaba ocupando um grande espaço em seu armazenamento. Caso o armazenamento não seja efetuado de forma correta o impacto ambiental pode vir a ser grande. Bernardes (2017) relata que as cinzas que sobram do processamento da cana-de-açúcar são colocadas no solo com outros resíduos industriais, como a torta e o vinhoto. Essa utilização dos resíduos funcionaria como fertilizante para o solo, mas as cinzas possuem nutrientes escassos com baixa dissolução, não sendo muito eficiente para essa função e ainda, esse resíduo não tem sua toxicidade avaliada.

Diversas alternativas viáveis para a destinação e reutilização das cinzas são pesquisadas, entre elas, como material inerte na construção civil, como material com atividade pozolânica e como adsorventes de baixo custo, porém, a falta de padronização no processo de queima dificulta sua utilização em processos produtivos (CACURO & WALDMAN, 2015). Apesar de diversas oportunidades apresentadas a busca por procedimentos com essa biomassa na qual gere um produto de alto valor agregado é necessária e de alto interesse industrial.

As cinzas possuem uma composição e morfologia heterogênea que variam em função dos parâmetros do processo de queima, tais como, a temperatura, tempo e tipo de biomassa (TEIXEIRA et al., 2008). Cacuro e Waldman (2015) relataram que com relação à morfologia,

as cinzas possuem três tipos de partículas: o material orgânico das cinzas (carbono não queimado), partículas de silicatos, dióxido de silício (SiO_2), e ainda espécies de óxidos de diferentes metais como K_2O , MgO , P_2O_5 e CaO . As cinzas são classificadas em leves (ou cinzas volantes com 3 a 5 mm) e pesadas (OKA, 2004; BASU, 2006; ROHDE & MACHADO, 2016) e são constituídas basicamente por compostos de silício e alumínio podendo ser utilizadas como matéria prima para síntese de zeólitas.

Zeólitas são alumino silicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, constituídas por arranjos tridimensionais de tetraedros de sílica $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e alumina $[\text{AlO}_4]^{5-}$, ligados entre si por átomos de oxigênio. Estas redes formam uma grande quantidade de espaços vazios e abertos, sendo estas responsáveis pela definição de inúmeras propriedades especiais das zeólitas (GIANNETTO, 1990). Como o alumínio possui valência menor que a do silício, a estrutura da zeólita apresenta uma carga negativa para cada átomo de alumínio. Esta carga é balanceada por cátions de compensação, normalmente Na^+ , K^+ e Ca^+ , que são livres para se moverem nos canais da rede e podem ser trocados por outros cátions em solução (AGUIAR *et al.*, 2002; GUINEST e RIBEIRO, 2004).

As zeólitas possuem larga aplicação industrial. As razões de seu êxito em catálise são sua alta área superficial, capacidade de adsorção, seus centros ácidos, o tamanho dos seus canais e cavidades e sua seletividade de forma (XU *et al.*, 2007). Estas características fazem com que as zeólitas sejam materiais interessantes para serem utilizados como trocadores iônicos (FOLETTTO *et al.*, 2000), peneiras moleculares e adsorventes (BIESEKI, 2013) e catálise (CASANOVA *et al.*, 2011).

A síntese tradicional de zeólitas utiliza hidrogéis como matéria prima. No entanto, diversos estudos e pesquisas são produzidos propondo diferentes métodos de síntese de zeólitas a partir de cinzas de biomassa (PAVLOVIC *et al.*, 2020). A maioria dos estudos utiliza como matéria-prima cinzas volantes de carvão como fonte de silício e alumínio para a produção de diversas zeólita. A literatura tem mostrado a obtenção de diferentes zeólitas, tais como zeólita X e zeólita A (BIESEKI *et al.*, 2013) de diferentes tipos de cinzas de carvão, zeólita P_1 de cinzas de bagaço de cana (FUNGARO *et al.*, 2014) e hidroxissodalita (FUNGARO e BRUNO, 2009).

A zeólita A (Figura 1) apresenta relação Si/Al igual a 1. A fórmula química de sua célula unitária pode ser expressa como $\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ (GIANNETTO, MONTES e RODRÍGUEZ, 2000).

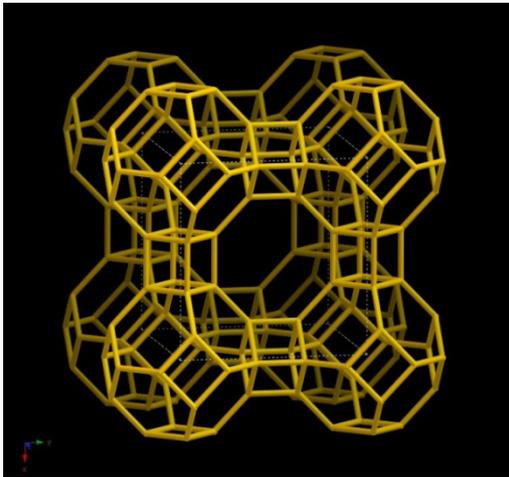


Figura 1: Estrutura da Zeólita A.

Fonte: www.iza-online.org

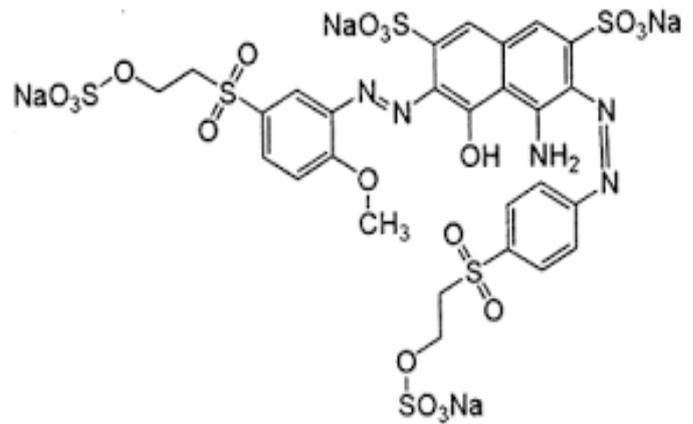


Figura 2: Estrutura molecular do corante Azul Reativo C.I. 250.

Fonte: <http://www.worlddyeveriey.com>

Vários aspectos são importantes para a síntese de zeólitas, tais como o tipo e a composição das cinzas, tipo e concentração do meio reacional, pressão, temperatura, tempo de reação e relação solução/cinzas (FUNGARO E BRUNO, 2009). Estudos já realizados pelo grupo (GOMES *et al.*, 2016; GOMES *et al.*, 2015) constatam a efetividade de produção da zeólita A, que associado a resultados positivos alcançados com a fotodegradação catalítica de corante RB250 (BORBAN *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2017), existente em efluentes de indústrias têxtil, pressupõe a possibilidade de desenvolvimento de fotocatalisadores a partir de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para degradação de efluente da indústria têxtil.

Do ponto de vista ambiental, a remoção da cor dos efluentes é um dos grandes problemas enfrentados pelas indústrias têxteis e a fotocatalise heterogênea tem se destacado cada vez mais nessa área. O problema da cor na indústria têxtil está relacionado principalmente aos corantes solúveis em água, entre eles os corantes reativos (FORGACS *et al.*, 2004), os azo-corantes ($R_1-N=N-R_2$) de difícil degradação (ZOLLINGER, 1991), tal como o corante sintético Azul Reativo C.I. 250, cuja estrutura molecular está representada na Figura 2.

Devido à sua durabilidade, baixo custo, baixa toxicidade, alta hidrofiliabilidade e notável estabilidade química e fotoquímica, os semicondutores são utilizados como fotocatalisadores na degradação de poluentes orgânicos. No entanto, esses semicondutores possuem algumas desvantagens que são a rápida recombinação elétron/lacuna, baixa adsorção e obre luz visível e baixa cobertura superficial dos fotocatalisadores (ZHU & ZHOU, 2019). Assim, o projeto de novos fotocatalisadores ainda é necessário.

Desta forma o presente trabalho teve como objetivo principal produzir fotocatalisadores a base de TiO_2 e ZnO suportados em zeólita A sintetizada a partir de cinzas volante provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de Si e Al.

2 | METODOLOGIA

As cinzas volantes provenientes da queima do bagaço de cana foram gentilmente cedidas por uma Agroindústria da região Norte do Paraná. As cinzas foram secas em

estufas à 105°C durante 24 horas (massa constante) depois foram peneiradas em peneiras convencionais.

As características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas volantes dependem de uma variedade de fatores, entre eles a composição do carvão que lhes deu origem e as condições de combustão, por isso, é difícil generalizar sobre suas características, o que torna necessário um estudo prévio a cerca deste material. Desta forma, primeiramente procedeu-se a caracterização química, física e morfológica das cinzas utilizando técnicas de Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

2.1 Síntese da Zeólita A

Para síntese da zeólita utilizou-se o método de fusão alcalina conforme modificação proposta por Gomes *et al.*, (2015) no qual 2,5 g de cinzas previamente secas foram misturadas com 2,8 g de hidróxido de sódio e 1,43 g de hidróxido de alumínio e transferidas para uma mufla para tratamento térmico a 550°C por 1 h (rampa de 10°C/min).

O material fundido foi triturado, peneirado e então se adicionou 20 mL de água deionizada. Posteriormente a solução foi transferida para um reator de teflon que permaneceu acondicionado em estufa a 100°C por 24 h. O material obtido foi lavado, filtrado a vácuo seco à temperatura ambiente (cerca de 25°C) por um período de dois dias. O material foi calcinado a 550°C por 5 h e encaminhado para caracterização por DRX e MEV.

2.2 Preparo dos Fotocatalisadores

Os fotocatalisadores suportados com 2 e 2,5% de fase ativa (ZnO) foram preparados pelo método de impregnação úmida (BRITES et al, 2011) no qual o óxido de zinco em quantidade suficiente para produzir catalisadores no teor desejado de fase ativa foi solubilizado em água. A solução foi adicionada à zeólita sintetizada à temperatura de 100°C por 24 h. O solvente foi retirado em rotaevaporador a 70°C sob vácuo até completa secagem do material. Os catalisadores denominados 2,0%ZnO/NaA; 2,5%ZnO/NaA foram levados à estufa por 12 h à 100°C. O material foi peletizado aplicando uma pressão de 1,5 ton_f/cm² em peletizador e então calcinado a 500°C durante 5 h. Finalmente os catalisadores foram peneirados para padronização.

Os catalisadores TiO₂/NaA suportados com 5% e 10% em peso de fase ativa foram preparados pelo método da impregnação úmida conforme procedimento descrito anteriormente para ZnO. A forma mineral do dióxido de titânio utilizado foi a Anatase.

Todos os catalisadores produzidos foram caracterizados por DRX, espectroscopia de fotoacústica, ponto de carga nulo e fisiossorção de nitrogênio.

2.3 Caracterizações

Fluorescência de Raios X: A análise de fluorescência de raios-X foi realizada a fim de conhecer com exatidão os componentes presentes na cinza. Para a realização da análise primeiramente previamente a amostra de cinza foi submetida a uma pressão de 24 torr

durante 60 s numa prensa da marca Amef. O equipamento utilizado para a análise foi o Advanced X-Ray Fluorescence Spectrometer da marca Rigaku disponível no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP/UEM) da Universidade Estadual de Maringá.

Difratometria de Raios X: Técnica empregada para identificar as fases cristalinas presentes nas amostras. A análise de difração de raios-X foi realizada em difratômetro LanX XRD-6000 – Shimadzu, pertencente ao Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP/UEM) da Universidade Estadual de Maringá, com coleta entre 5° e 50° (2 theta), velocidade do goniômetro de 0,05°/minuto, 30 kV e 15 mA. As caracterizações das amostras foram realizadas a partir do software X'Pert HighScore, através de comparação com os difratogramas gerados com padrões de referência, acessível em seu banco de dados.

Microscopia Eletrônica de Varredura: A microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada com equipamento Quanta FEI 250, localizado na Central de Microscopia da Universidade Estadual de Maringá, que fica na COMCAP-UEM. A imagem foi ampliada 5000 vezes.

Espectrofotometria de Fotoacústica: A análise de Espectroscopia Fotoacústica teve como objetivo determinar a energia *band gap* dos catalisadores estudados. Esta análise foi realizada em um equipamento no Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá (DFI-UEM), com programação de fenda de 3,16, velocidade de 300 m/s, frequência de 23Hz e tempo de espera de 1 s.

Fisiossorção de N₂: As propriedades texturais dos fotocatalisadores, tais como área superficial específica, volume de microporos e diâmetro médio de microporos foram determinadas por isotermas de equilíbrio de adsorção física de N₂ utilizando o equipamento QuantaChrome NOVA do Laboratório de Catálise DEQ/UEM.

Ponto de Carga Zero: Determinou-se o ponto de carga nula (pH_{zpc}) dos catalisadores suportados em termos do pH da suspensão (Equação 1) que foi medido por um pHmetro TECNAL pH METER TEC-2, do Laboratório de Catálise DEQ/UEM (GILLMAN & UEHARA, 1980).

$$\text{pH}_{\text{zpc}} = 2 \cdot \text{pH}_{(\text{KCl})} - \text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})} \quad (1)$$

2.4 Testes Fotocatalíticos

Os testes fotocatalíticos foram realizados em reator de vidro tipo (500ml) preenchido com 300ml de solução de corante (10mg/L), o sistema (Figura 3) foi irradiado por lâmpada de vapor de mercúrio de duas formas distintas: com e sem a cobertura de vidro, com radiação UV, na presença de 2g/L de catalisador, com duração de 5 horas. A temperatura do meio reacional foi mantida constante a 25°C através de sistema de refrigeração e a agitação do meio foi realizada por agitadores magnéticos com 6 cm de comprimento. Alíquotas foram recolhidas periodicamente com intervalos de 1 h, filtradas em membrana HV Durapore (0,45 UM de poro) e analisados utilizando espectrofotometria de UV-Vis (espectrofotômetro portátil

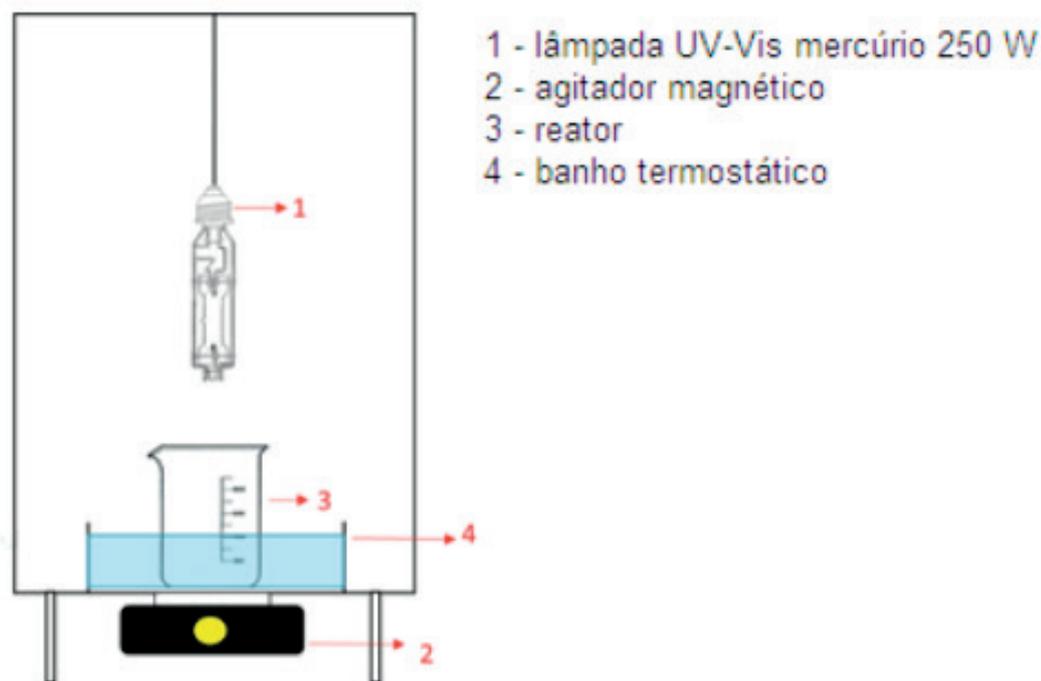


Figura 3: Módulo reacional (reator batelada).

O percentual de descoloração foi fornecido pela Equação 2.

$$\text{Descoloração}(\%) = \frac{C_i - C}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

Em que “ C_i ” é a concentração inicial do corante e “ C ” é a concentração de corante após 5 h de irradiação.

3 | RESULTADOS

No difratograma das cinzas volantes apresentado na Figura 4 é possível identificar as fases cristalinas presentes nas cinzas, tais como quartzo (SiO_2) em 2θ igual a $21,0^\circ$; $26,7^\circ$; $36,7^\circ$; $39,5^\circ$; $50,3^\circ$ e $60,1^\circ$, alumina (Al_2O_3) a $25,9^\circ$; $43,5^\circ$; $57,6^\circ$ e $68,1^\circ$; hematita (Fe_2O_3) nos picos $33,2^\circ$; $35,9^\circ$; $39,7^\circ$ e $41,0^\circ$ de peças da indústria de metal misturadas com bagaço; calcita (CaCO_3) $23,2^\circ$; $29,5^\circ$; $36,2^\circ$; $39,2^\circ$; $47,3^\circ$ e $48,4^\circ$; e pentóxido de fósforo (P_2O_5) $28,2^\circ$; $29,5^\circ$; $40,5^\circ$; $54,1^\circ$ e $66,8^\circ$. A intensidade dos picos evidencia, além de evidenciar a presença de fase cristalina permite verificar a presença de material amorfo devido a presença do halo entre 18 e 38° (2θ) no difratograma. A micrografia das cinzas revelou tamanhos de partículas e formas bastante variadas e com alta porosidade que segundo Cordeiro *et al.* (2009) é consequência da liberação da matéria orgânica durante a queima do bagaço. A composição química das cinzas do bagaço proveniente da cana-de-açúcar foi determinada por fluorescência de Raios-X.

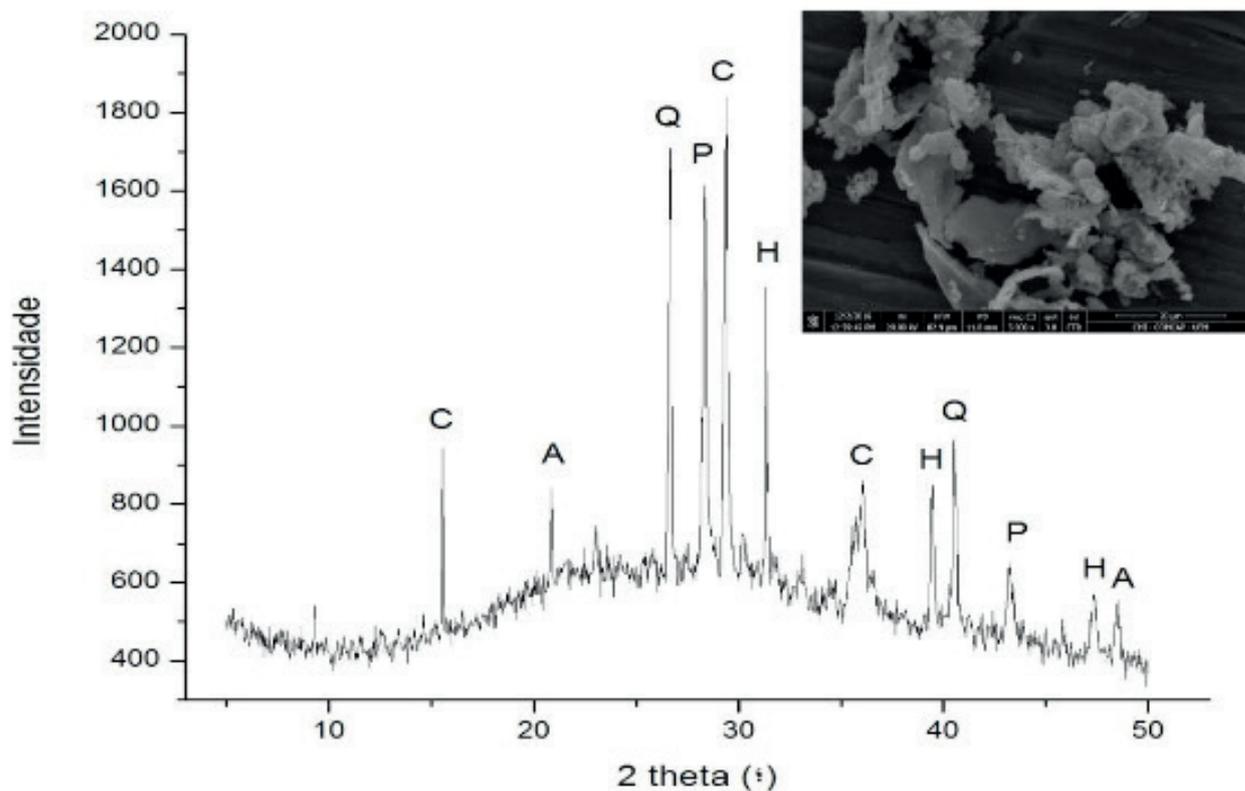


Figura 4: Difratoograma de raios X da cinza de caldeira. Q: Quartzo; C: Calcita; H: Hematita; A: Alumina; P: Pentóxido de fósforo.

A presença de dióxido de silício na composição da cinza tem origem no silício absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossilício (H_4SiO_4) e através da transpiração ocorre à saída da água das plantas, a sílica gel se deposita na parede externa das células da epiderme.

Composto	Teor (% em massa)
SiO_2	34,00
CaO	16,50
Al_2O_3	12,20
Fe_2O_3	11,70
K_2O	9,30
Cl	4,07
MgO	3,77
SO_3	2,22
P_2O_5	1,94
TiO_2	1,92
Na_2O	1,17
Demais compostos	1,18

Tabela 01: Composição química da cinza.

A partir da síntese hidrotérmica, observou-se a formação da zeólita A como pode ser

visto marcado no difratograma da Figura 5. Nota-se também a presença de picos de quartzo (21,0°, 26°, 7°, 50,3°) e calcita (29,5°). Mediante análise do difratograma pode-se perceber que o material formado (zeólita A) tem maior cristalinidade quando comparado à cinza, o que já era esperado.

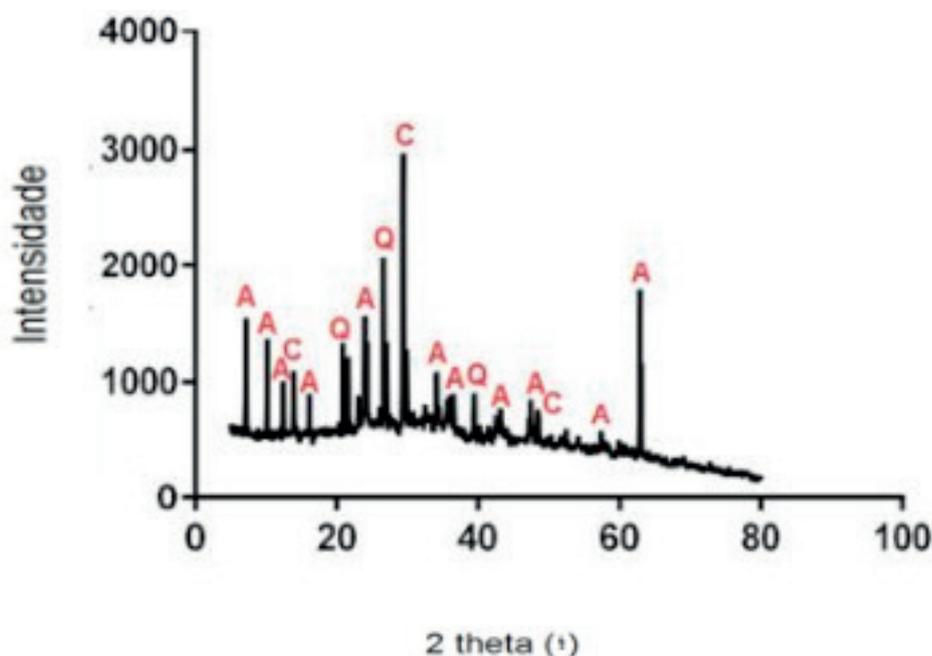
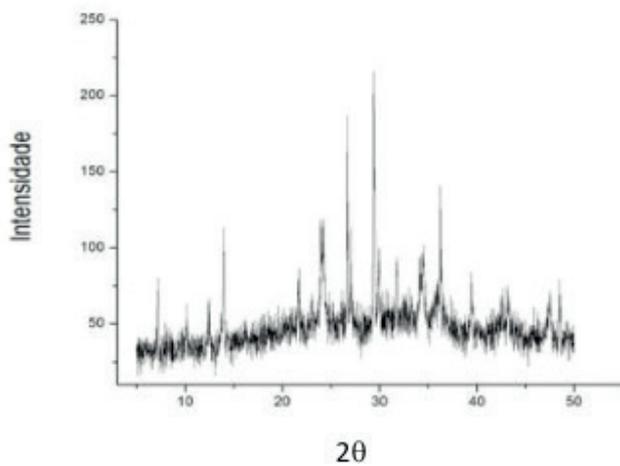
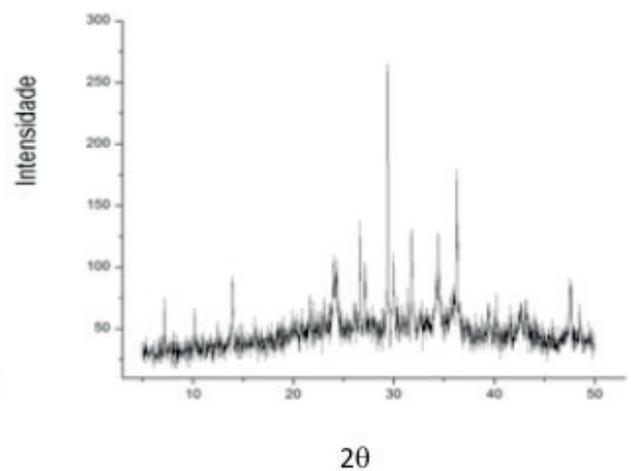


Figura 5: Difratograma de raios X para zeólita sintetizada. A: zeólita NaA; Q: Quartzo. C: Calcita.

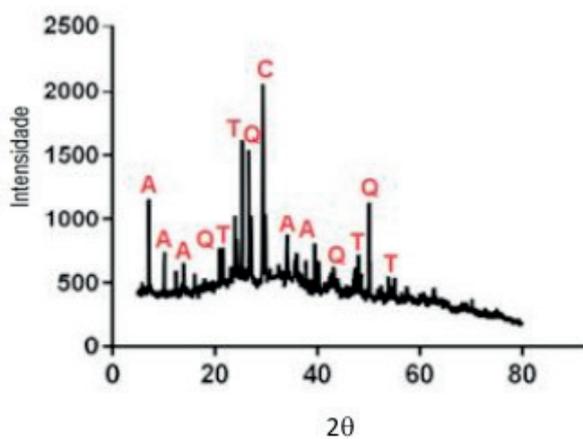
Após a impregnação dos semicondutores os catalisadores produzidos foram novamente submetidos à análise de difração de Raios-X e os difratogramas podem ser visualizados nas Figuras de 6 (a), (b), (c) e (d). Da observação das Figuras 6 (a) e (b) nota-se que com o da zeólita A obtido (Figura 5) nota-se que não houve alteração na estrutura cristalina dos catalisadores após a impregnação e calcinação, pois, os picos presentes no difratograma da zeólita pura permaneceram inalterados nos difratogramas obtidos para as zeólitas impregnadas com óxidos. Quando realizado a impregnação de ZnO (Figura 6 (a) e (b)), em ambas as concentrações não foi observado nenhum pico adicional aos da zeólita, ou seja, não foi possível detectar picos de óxido de zinco impregnados nessa matriz. Porém, houve uma diminuição significativa da intensidade dos picos apresentados. Tal fato pode ser explicado por dois motivos, um deles é que os cristais de óxidos são muito pequenos (menor que 2 nm) e o outro é que os óxidos estão bem dispersos no catalisador.



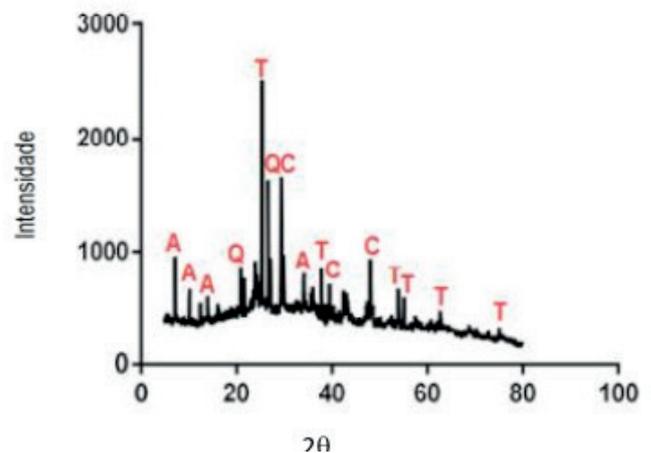
a) Difratoograma de raios X do Catalisador a 2,5% (m/m) de ZnO.



(b) Difratoograma de raios X do Catalisador a 5,0% (m/m) de ZnO.



c) Difratoograma de raios X do Catalisador a 5% (m/m) de TiO₂.



(b) Difratoograma de raios X do Catalisador a 10,0% (m/m) de TiO₂.

Figura 6: DRX do catalisador. A: zeólita NaA; Q: Quartzo; C: Calcita; T: Dióxido de Titânio anatase.

Os picos referentes ao dióxido de titânio coerentemente apresentam maior intensidade para catalisador com maior percentual de fase ativa. Os picos referentes à zeólita permaneceram inalterados comprovando que não houve alteração após a impregnação desse semicondutor e da calcinação. Após impregnação dos óxidos na zeólita NaA houve uma grande redução dos parâmetros texturais (Tabela 2). A redução na área total BET indica que houve uma ocupação quase completa da superfície zeolítica, porém, com uma má distribuição. Para a área e volume de microporos para esses catalisadores percebeu-se que houve uma obstrução completa dos poros pelo material imobilizado, dado pela anulação do parâmetro. O aumento no diâmetro do poro se deve aos aglomerados de fase ativa na superfície zeolítica acarretando em aumento errôneo do diâmetro do poro do catalisador suportado (BREK, 1976).

Catalisador	S_{BET}^a ($m^2 \cdot g^{-1}$)	$S_{micr.}$ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	$V_{micr.}$ ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	D_p (Å)
NaA	51,0	36,0	0,02	8,8
2,5%ZnO/NaA	5,616	0,2998	$7,764 \times 10^{-5}$	16,27
5%ZnO/NaA	0,607	9,866	$4,396 \times 10^{-3}$	34,58
5%TiO ₂ /NaA	3,798	0,7097	$1,716 \times 10^{-3}$	14,12
10%TiO ₂ /NaA	10,439	0	0	21,02

^a Área específica BET calculada a partir da parte linear da trama BET ($P/P_0 = 0,1-0,3$).

Tabela 2. Parâmetros texturais dos suportes e catalisadores suportados.

O ponto de carga nula (pH_{PCZ}) é uma informação importante pois caracteriza um dos fatores limitantes para que ocorra o fenômeno da adsorção. Quando o pH do meio reacional $pH > pH_{PCZ}$ a superfície do catalisador tende a ficar com densidade de cargas positiva, decorrente da adsorção de íons H^+ . Quando $pH < pH_{PCZ}$ ocorre a dessorção de H^+ ou adsorção de OH^- na superfície do catalisador (KOSMULSKI, 2011).

Kosmulski (2011) relata que o TiO_2 apresenta pH_{PCZ} próximo à 6,0 enquanto os óxidos de zinco em torno de 8,9. Observa-se que todos os catalisadores apresentaram pH_{ZPC} bem diferente do valor relatado ao óxido puro e/ou do suporte. Tal observação leva a crer no efeito suporte. Como os catalisadores preparados apresentaram pH_{PCZ} distante do pH da solução tratada (normal que testes fotocatalíticos ocorram em pH de 6,0) espera-se que ocorra uma descompensação de cargas na superfície do catalisador (Tabela 3). Essa descompensação favorecerá o fenômeno de adsorção do corante à superfície, devido ao surgimento de forças eletrostáticas. Essa adsorção pode limitar a fotocatalise, isso, pois a fase ativa do catalisador estará recoberta pelo adsorbato, impedindo assim a adsorção da água, agindo em maior quantidade, no caso, a oxidação direta do corante ($corante \leftrightarrow corante^+ + e^-$) na superfície e a fotólise da água no seio do fluido.

Catalisadores suportados e suporte	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	pH_{ZPC}	Gap de energia (eV)
2,5%ZnO/NaA	9,58	8,42	7,26	4,25
5%ZnO/NaA	9,79	7,95	6,11	4,47
5%TiO ₂ /NaA	10,67	9,41	8,15	3,29
NaA		8,52	7,17	4,13
	9,87			

10%TiO₂/NaA – 3,32 eV

Tabela 3: Resultados do ponto de carga nula dos catalisadores suportados e do suporte

O valor de *gap* de energia (Tabela 3) calculado pela equação proposta por Tauc et al. (1966), para as zeólita NaA (4,1eV) não necessariamente indica o valor da energia de excitação dos elétrons da banda de valência. Zeólitas não são semicondutores, logo a energia calculada é referente à excitação dos átomos de alumínio na estrutura zeolítica (BRITES et al., 2011).

Uma redução no valor da energia do *band gap* foi identificada após a deposição e a impregnação do TiO₂ e ZnO nas zeólitas. A redução se deve ao efeito sinérgico entre a zeólita e o metal óxido suportado denominado efeito plasma. Na imobilização do catalisador pode ocorrer a formação de nanocristais nos canais e poros da zeólita acarretando na redução da energia de absorção dos fótons (UENOA & MISAWA, 2013). A faixa de energia de *band gap* obtidas ainda se encontram na região do UV, próximo ao violeta, não sendo, portanto, aplicável sobre luz solar nessas condições.

Ensaio Fotocatalítico

Os ensaios fotocatalíticos foram realizados com lâmpada UV – vis de mercúrio. Foi estudada a influência do bulbo protetor na degradação de corante RB-250 utilizando óxido de zinco como catalisador, suportado em zeólita A, sintetizada a partir de cinzas residuais proveniente do bagaço da cana-de-açúcar. Os fotocatalisadores produzidos nesse trabalho apresentaram atividade catalítica semelhante na fotodegradação do corante utilizado. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos com os fotocatalisadores de ZnO/NaA nas diferentes concentrações produzidas.

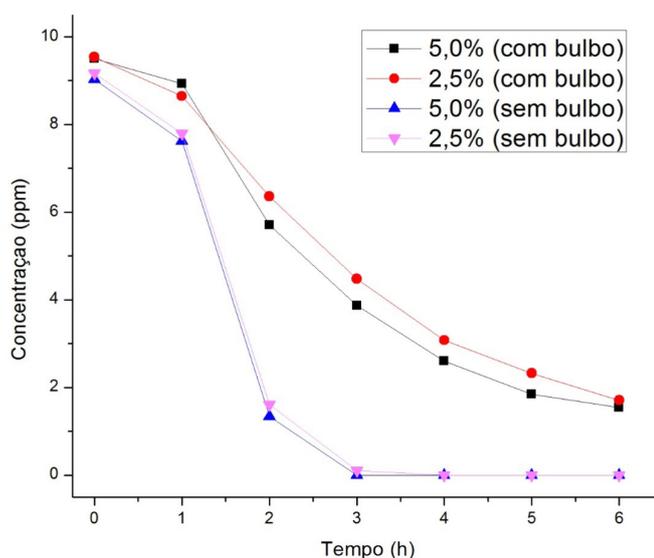


Figura 7: Degradação fotocatalítica do corante sintético (10ppm) utilizando 1 g.L⁻¹ de catalisador suportado em zeólita sintetizada partir da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Espera-se que maiores concentrações de óxido metálico suportado, maior a área ativa do catalisador, maior a atividade fotocatalítica, porém, para o fotocatalisador de ZnO/NaA o efeito do percentual de semiconductor presente na matriz zeolítica não foi tão significativo

quanto a irradiação, o que já era de se esperar visto os resultados apresentados para a energia de *band gap* mostrou melhor aproveitamento para luz na faixa UV. O mesmo comportamento foi observado quando utilizado 5%TiO₂/NaA, porém, quando utilizado 10% TiO₂/NaA obteve maior degradação do corante quando comparado a concentrações menores.

Na primeira hora de adsorção, uma pequena quantidade foi adsorvida no catalisador com 2,5%ZnO/NaA, isso porque há menos área ativa, maior superfície zeolítica e pH_{PCZ} mais distante do pH da solução, ocorrendo um desequilíbrio de cargas entre a superfície e a solução favorecendo a adsorção.

4 | CONCLUSÃO

É possível utilizar cinzas residuais provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar como fonte primária de silício e alumínio para síntese de zeólita. As análises de difração de raios-X realizadas pós síntese por fusão alcalina confirmaram a presença de zeólita A.

Os testes fotocatalíticos demonstraram que o catalisador contendo 5% de óxido metálico na zeólita promove melhor degradação do corante RB-250, em reação sem o bulbo protetor.

A utilização de cinzas residuais provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar como fonte primária de silício e alumínio na síntese de zeólitas é uma alternativa interessante e inovadora para o uso dessa biomassa, assim diminuindo significativamente o impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. **Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos**. Química Nova, v. 25, n. 6b, p. 1145-1154, 2002.
- ANDREOLA, R., SANTOS, A. D. V. DOS. Estudo da disposição adequada de cinza de caldeira em usinas de cana-de-açúcar. Anais do CONCCEPAR, 2011. Disponível em: <<http://www.grupointegrado.br/conccepar2011>>.
- BIESEKI, L.; PENHA, F. G.; PERGHER, S. B. C. **Zeolite A synthesis employing a Brazilian coal ash as the silicon and aluminum source and its applications in adsorption and pigment formulation**. Materials Research, v. 16, n. 1, p. 38-43, 2013.
- BORBAN, L. S.; MARTINS, R. P.; OLSEN SCALIANTE, M. H. N. **Degradação de corante têxtil com fotocatalisadores produzidos a partir de cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. Anais do VII Simpósio de Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2017. Disponível em www.ctc.uem.br/seq
- BREK, D. **Zeolite molecular sieves** (in Russian), Mir, Moscow, 1976.
- Brites, F. F.; SANTANA, V. S.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C.. **Effect of Support on the Photocatalytic Degradation of Textile Effluents Using Nb₂O₅ and ZnO: Photocatalytic Degradation of Textile Dye**. Top Catal. v. 54, p. 264 – 269, 2011.
- CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. **Cinzas da queima da biomassa: aplicações e potencialidades**. Ver. Virtual Quim. V. 7, n. 6, p. 2154 – 2165, 2015.

CASANOVA, C.; MEZZALIRA, V.; MUNIK, R.; OLIVEIRA, A.; M. PERGHER, S.B.C.; EMMERICH, D. J. **Síntese de 1,2,3-triazóis utilizando zeólitas como catalisador**. *Perspectiva*, v. 35, n. 131, p. 27-33, 2011.

CONAB, 2017. **Conjuntura mensal – 05 de maio de 2017**. Disponível em WWW.conab.gov.br.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. *Química Nova*, v. 32, n. 1, p. 82-86.

ESPLUGAS, S., GIMÉNEZ, J., CONTERAS, S., PASCUAL, E., RODRÍGUEZ, M. **Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation**. *Water Research*, v. 36, p. 1034 - 1042, 2002.

FOLETTI, E. L.; KUHNEN, N. C.; JOSÉ, H. J. **Síntese da zeólita ZSM-5 e suas propriedades estruturais após troca iônica com cobre**. *Cerâmica*, v. 46, n. 300, p. 210-213, 2000.

FONSECA, J. A.; HANISCH, A. L. **Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica?** *Revista de Ciências Agroveterinárias. Journal of Agroveterinary Sciences*. v.17, n. 4, 2018.

FRANUS, W. **Characterization of X-Type zeolite prepared from coal fly ash**. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 21, n. 2, p. 337-343, 2012.

FUNGARO, D. A.; REIS, T. V. S.; LOGLI, M. A.; OLIVEIRA N. A. **Synthesis and characterization of zeolitic material derived from sugarcane straw ash**. *American Journal of Environmental Protection*, v. 2, n. 1, p. 16-21, 2014.

FUNGARO, D. A.; BRUNO, M. **Remoção de azul de metileno de solução aquosa usando zeólitas sintetizadas com amostras de cinzas de carvão diferentes**. *Química Nova*, v. 32, n. 4, p. 955-959, 2009

GIANNETTO, G.; **Zeolitas: características, propiedades y aplicaciones industriales**. Editorial Innovación Tecnológica: Caracas, 1990.

GILLMAN, G.P.; UEHARA, G. **Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: II. Experimental**. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.252-255, 1980.

GOMES, A. D.; VICENTINI, J. C. M.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C.; OLSEN SCALIANTE, M. H. N. **Synthesis of Zeolite A by hydrothermal and alkaline fusion methods using alternative source of silica and alumina**. In 18th International zeolite Confer^{nce} – zeolites for a sustainable world. Rio de Janeiro, 2016.

GOMES, A. D.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C.; OLSEN SCALIANTE, M. H. N. **Investigação do potencial de uso de cinzas de caldeira para síntese de zeólitas**. In IX EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Unicesumar. Maringá, PR, 2015. Disponível em cesumar.br/diretoria-de-pesquisa/anais-eventos-epcc.php

KOSMULSKI, M. **The pH-dependent surface charging and points of zero charge. V. Update**. *Journal of Colloid and Interface Science*. v. 353, p. 1 – 15, 2011.

MARTINS, R. P.; BORBAN, L. S.; OLSEN SCALIANTE, M. H. N. **Tratamento de efluente têxtil utilizando fotocatalisadores produzidos a partir de cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar e dióxido de titânio**. *Anais do VII Simpósio de Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2017*. Disponível em www.ctc.uem.br/seq

PAVLOVIC, S. M.; MARINKOVIC, D. M.; VELJKOVIC, V. B. A CaO/zeolite-based catalyst obtained from waste chicken eggshell and coal fly ash for biodiesel production. *Fuel*. v. 267,n. 1. Article 117171, 2020.

TAUC, J.; GRIGOVVICI, R.; VANCU, A. **Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous**

Germanium. Physica status solid (b), v. 15, issue 2, p. 627- 637, 1966.

TEIXEIRA, S. R.; de SOUZA, A. E.; SANTOS, G. T. A.; PEÑA, A. F. V.; MIGUEL, A. G. **Sugarcane bagasse ash as a potential quartz replacement in red ceramic.** Journal of the American Ceramic Society. v. 91, p.1883. 2008.

UENO, K.; MISAWA, H.; **Surface plasmon-enhanced photochemical reactions.** Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. v.15, p. 31 – 52, 2013.

VASCONCELOS, Y. **Cinzas de Valor.** Pesquisa FAPESP 174 (2010) p. 71. Disponível em <http://revistapesquisa.fapesp.br/2010/08/11/cinzas-de-valor/>. Data de acesso: 22/08/2017.

XU, R.; PANG, W.; YU, J.; HUO, Q.; CHEN, J. Chemistry of zeolite and related porous materials. Wiley – Interscience: Weinheim, 2007.

ZHU, D.; ZHOU, Q. **Action and mechanism of semiconductor photocatalysis on degradation of organic pollutants in water treatment: A review.** Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. v.12, Article 100255. 2019.

ZOLLINGER, H. R. **Color Chemistry: Syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments.** Wiley -VCH: Weinheim, New York, 2nd Edition, 1991.

EFEITO DA GRANULOMETRIA DA FIBRA DE COCO VERDE NA ADSORÇÃO DE COMPOSTOS PROVENIENTES DO PETRÓLEO

Data de aceite: 19/06/2020

Data de submissão: 04/03/2020

Isadora Barreto Coutinho

Instituto Mauá de Tecnologia

São Caetano do Sul – SP

<http://lattes.cnpq.br/9341081530889560>

Inês Aparecida Santana

Instituto Mauá de Tecnologia

São Caetano do Sul – SP

<http://lattes.cnpq.br/9374449669119411>

Antonia Miwa Iguti

Instituto Mauá de Tecnologia

São Caetano do Sul – SP

<http://lattes.cnpq.br/0835667994763014>

RESUMO: O trabalho foi movido pelo interesse em propor uma alternativa para dois grandes problemas ambientais. Um deles se refere à elevada quantidade de resíduos gerados pelo consumo de água de coco verde no Brasil e, o outro diz respeito à contaminação do solo e de águas subterrâneas por compostos provenientes da gasolina, decorrente do vazamento de combustíveis em postos de distribuição. Tendo isso em vista, a ideia do trabalho foi de aproveitar a fibra de coco verde utilizando-a como adsorvente de compostos derivados

do petróleo, especificamente neste trabalho, o benzeno e o tolueno. Para isso, avaliou-se, em escala laboratorial, a influência da granulometria da fibra na adsorção desses compostos. A classificação das fibras foi realizada em peneiras conforme as seguintes granulometrias: < 0,212 mm; (0,212-0,425) mm; (0,425-0,600) mm; (0,600-0,850) mm e (0,850-1,00) mm, sendo que predominaram as duas faixas granulométricas inferiores (< 0,425 mm, com 69 %). Os resultados mostraram que a fibra apresentou boa capacidade de adsorção de benzeno (> 95 %), não apresentando diferença significativa entre as granulometrias. Quanto ao tolueno, a adsorção mostrou-se significativamente menor na granulometria entre 0,850 mm e 1,00 mm, mas igualmente eficiente nas demais.

PALAVRAS-CHAVE: Granulometria, fibra, coco, adsorção, BTEX.

GREEN COCONUT FIBER
GRANULOMETRY'S EFFECT ON
PETROLEUM'S COMPOUNDS
ADSORPTION

ABSTRACT: The project aimed to propose an alternative for two big environmental problems. One of them refers to high amount

of waste generated by green coconut water consumption in Brazil and, the other concerns to soil and groundwater contamination by compounds from gasoline, due to fuel leakage at gas stations. With that in mind, the idea was to use green coconut fiber as adsorbent of compounds from petroleum, specifically in this work, benzene and toluene. Thus, the influence of fiber's granulometry in adsorption of this compounds was evaluated on a laboratory scale. Fiber classification was performed in sieves according to the following granulometries: < 0.212 mm; (0.212-0.425) mm; (0.425-0.600) mm; (0.600-0.850) mm and (0.850-1.00) mm; with predominance of both lower granulometry's ranges (< 0.425 mm, with 69 %). Results showed that fiber presented good capacity of benzene's adsorption (> 95 %), showing no significant difference between granulometries. Toluene's adsorption was significantly lower in granulometry between 0.850 mm and 1.00 mm, but equally efficient in the others.

KEYWORDS: Granulometry, fiber, coconut, adsorption, BTEX.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 280 mil hectares cultivados com coqueiro, distribuídos em quase todo o território nacional com produção equivalente a 2 bilhões de frutos (CUENCA et al., 2017; IBGE, 2016). Cada fruto apresenta entre 2 kg e 2,5 kg, dos quais até 70 % transforma-se em resíduo volumoso e de lenta decomposição. Dentre estes 2 bilhões de cocos produzidos anualmente, metade é de coco verde destinado à extração da água. Já a outra metade corresponde ao coco seco, sendo que este constitui matéria prima para a produção de derivados que incluem o coco ralado e do leite de coco, dentre outros. O fato é que apenas 10 % do resíduo do coco verde é reciclado e, devido aos altos custos do processo de reciclagem, torna-se um problema ambiental (IDOETA, 2014).

Por outro lado, há outra preocupação, ainda mais relevante, que se refere ao bem mais precioso de toda a população mundial: a água. Esta já está sendo considerada, especialmente pela população brasileira, como um recurso natural que pode se esgotar a qualquer momento. O cuidado com a água não se restringe apenas à quantidade, mas abrange também sua qualidade. É nesse sentido que, considerando que o Brasil conta com mais de 39 mil postos de distribuição de combustíveis, já se manifestam preocupações com a possível contaminação de águas subterrâneas decorrente de vazamentos em postos de combustíveis (OLIVEIRA e LOUREIRO, 1998).

A gasolina é uma mistura complexa de diversos hidrocarbonetos obtidos por destilação e craqueamento do petróleo, sendo estes mais leves quando comparados aos hidrocarbonetos provenientes do óleo diesel (OLIVEIRA E LOUREIRO, 1998). Por isso, a gasolina possui maior solubilidade e volatilidade além de uma menor viscosidade em relação ao óleo diesel, fatores estes que conferem a mesma uma maior mobilidade no solo, ocasionando em maior impacto para o meio ambiente. Os compostos aromáticos estão entre os hidrocarbonetos provenientes da gasolina que causam maior preocupação, em especial, os BTEX, pelo fato destes serem os mais solúveis em água e também mais tóxicos quando comparados aos demais (LOPES, 2011). Sua toxicidade deve-se ao fato de essas substâncias serem

depressores do sistema nervoso central e por serem comprovadamente cancerígenas (SILVA et al., 2009). Estes compostos, se forem inalados, ingeridos ou até mesmo se ficarem expostos em curtos períodos de tempo, podem ser fatais (FUNDACENTRO, 2012). Dentre os BTEX, o benzeno é o mais tóxico e seu padrão de potabilidade, ou seja, a máxima concentração admitida em água potável é de $5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2000).

O processo de adsorção é um fenômeno, químico ou físico, que está relacionado à área superficial do sólido, o adsorvente, sendo a fase gasosa ou líquida denominada adsorbato. Dessa forma, a adsorção consiste na adesão de moléculas à superfície de um sólido (BEZERRA, 2017).

O desequilíbrio eletrostático gerado pela irregularidade de uma superfície, em nível molecular, é capaz de gerar um campo de força, ao seu redor, atraindo as moléculas de um fluido em contato com essa superfície por um determinado tempo (ROUQUEROL et al., 1999).

A adsorção é classificada em química (quimiossorção) ou física (fisissorção), dependendo do tipo de forças envolvidas entre a superfície sólida e o fluido (BEZERRA, 2017). A fisissorção é caracterizada pelo envolvimento de forças mais fracas (interações moleculares dipolo permanente, dipolo induzido e ligações de Van Der Waals). A energia gerada neste tipo de adsorção comporta-se como em um fenômeno de condensação, apresentando pequena variação de entalpia, além de ser uma adsorção sempre exotérmica e reversível. Além disso, esta não possui modificação na natureza das espécies envolvidas (ROUQUEROL et al., 1999).

Por outro lado, a quimiossorção se relaciona com a formação de ligações químicas entre as valências livres do sólido e do adsorbato, alterando a estrutura eletrônica da molécula quimicamente adsorvida, apresentando o calor de adsorção na ordem do calor da reação, tornando a reação extremamente reativa (BEZERRA, 2017). Este tipo de adsorção ocorre em altas temperaturas, diferente da fisissorção, podendo ser irreversível (FOGLER, 2012).

Contextualizando, o uso da fibra como adsorvente de BTEX presentes na gasolina (GALIANGO et al., 2015), tornou-se uma combinação capaz de minimizar as consequências de ambos os problemas anteriormente mencionados. Galiango et al. (2015) realizaram estudos que comprovaram que a fibra apresenta capacidade de adsorção dessas substâncias monoaromáticas.

Dessa forma, dentro do projeto maior que visa estudar a adsorção dos BTEX - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos, presentes em água contaminada com gasolina, em fibra de coco verde, o objetivo específico deste trabalho foi estudar a influência da granulometria da fibra de coco verde na adsorção do benzeno e do tolueno, em processo contínuo por meio de percolação em coluna.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os cocos verdes, obtidos no mercado local, foram higienizados e perfurados para a retirada da água de coco. Em seguida foram cortados ao meio, obtendo-se a matéria prima

propriamente dita, ilustrada na Figura 1.



Figura 1 — Coco verde antes da extração da polpa

Fonte: Arquivo da autora (2017).

Após a remoção manual da polpa, fragmentou-se sua casca em triturador de coco verde da marca Trapp, modelo TRC 40 e, em seguida, a fibra obtida foi lavada em água corrente e a secagem foi realizada em estufa com renovação e circulação de ar MA037, por 24 horas. A Figura 2 ilustra as fibras durante e após a secagem.



Figura 2— (A) Secagem em bandejas, na estufa, e (B) Fibras secas, antes da moagem

Fonte: Arquivos da autora (2017).

Após a secagem da fibra, esta foi então moída no Moinho de Facas de marca Splabor e modelo 26934, como mostrado na Figura 3 (A). Em seguida, a fibra moída foi tamisada em peneiras padronizadas com o uso de agitação mecânica, sem compressão. A classificação da fibra foi realizada de acordo com as seguintes granulometrias: $< 0,212$ mm; $(0,212-0,425)$

mm; (0,425-0,600) mm; (0,600-0,850) mm e (0,850-1,00) mm. A Figura 3 (B) mostra um exemplo de granulometria da fibra já separada.

Os procedimentos de fragmentação, lavagem, secagem, moagem e separação foram realizados em triplicata.

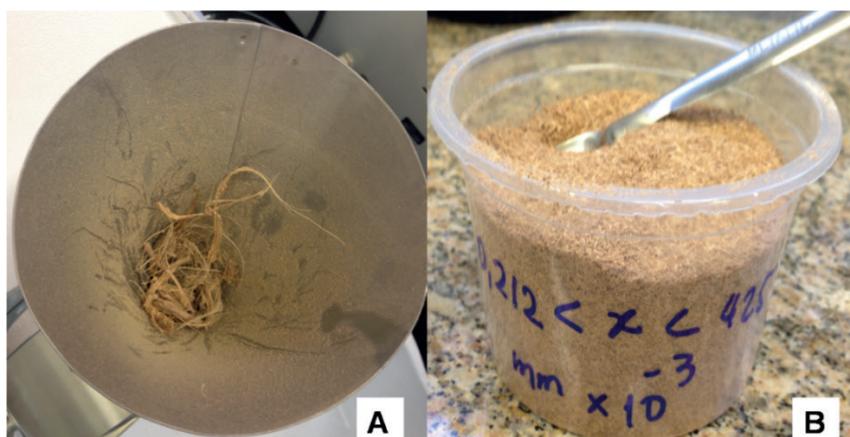


Figura 3 — A) Processo de moagem da fibra em moinho de facas B) Fibra de granulometria entre 0,212 e 0,425 mm

Fonte: Arquivos da autora (2017).

Separadas de acordo com as granulometrias, as fibras foram então utilizadas nos ensaios de adsorção do benzeno e do tolueno.

Primeiramente, foram preparadas soluções hidroalcoólicas de benzeno e de tolueno, separadamente, em balões volumétricos de 100 mL. A primeira solução apresentou concentração volumétrica de 27,5 % de etanol e $0,80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de benzeno. Já a segunda, apresentou $0,47 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de tolueno na mesma concentração de etanol. Cada concentração está próxima a sua solubilidade em água.

A coluna de aço inoxidável, de 270 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro interno, foi fixada em um suporte universal, na posição vertical. Foi preenchida com 4 g de fibra (GALIANGO et al., 2015) e a percolação foi realizada com fluxo ascendente (entrada pela parte inferior e coleta pela parte superior da coluna), para evitar a formação de bolhas no meio das fibras durante o processo. A Figura 4 ilustra o sistema utilizado para os ensaios de adsorção em coluna.

Um volume de 5 mL da solução de benzeno foi aplicado na coluna, em vazão de $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, controlada por bomba de HPLC. Em seguida a coluna foi percolada com água desionizada (Sistema MilliQ – Merck-Millipore). Após descarte do volume morto, realizou-se a coleta de 30 mL de eluato, dos quais 5 mL foram transferidos para um *vial* de 20 mL (vidro para *headspace* com tampa magnética rosqueável contendo septo – Agilent) para posterior análise. Esse processo de aplicação do benzeno e coleta de eluato foi denominado ciclo. Na mesma coluna foram repetidos mais três ciclos. Também foi preparado um controle com 5 mL de solução de benzeno somados a 25 mL de água desionizada. Em seguida, a coluna foi esvaziada para outro ensaio. Portanto, cada ensaio foi constituído de um controle e quatro

ciclos.

O procedimento foi utilizado no estudo da adsorção do benzeno e do tolueno, em todas as faixas granulométricas analisadas, em duplicata, sendo que as análises foram realizadas sempre imediatamente após a percolação, ou seja, os eluatos nunca eram armazenados.

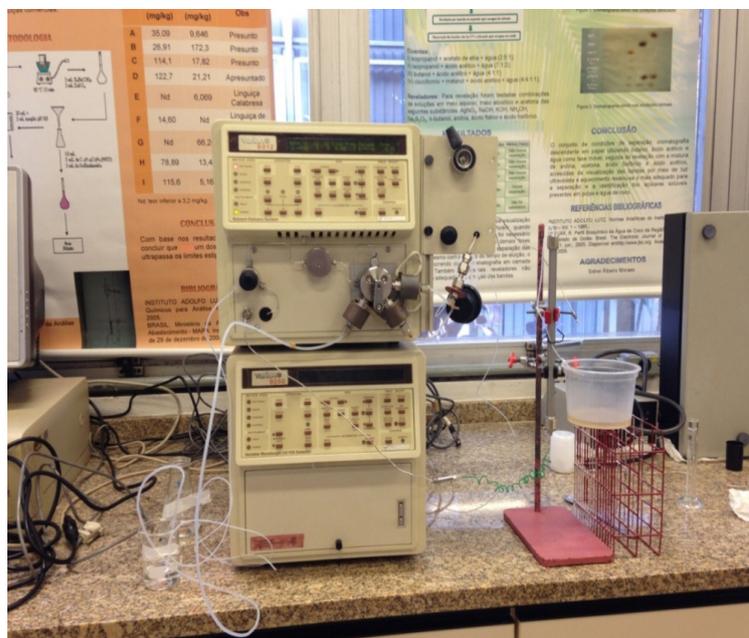


Figura 4 — Percolação feita através da coluna de aço inox com o auxílio de bomba HPLC

Fonte: Arquivo da autora (2017).

As análises cromatográficas de cada eluato foram realizadas de acordo com a metodologia descrita por Sakata et al. (2004), nas seguintes condições: cromatógrafo de marca Agilent, modelo 7890A com CTC PAL ALS (injetor automático por amostragem em *headspace*: incubação a 80 °C por 20 min); detector de ionização em chama (FID) a 300 °C; coluna capilar DB-17MS (30 m), 0,25 mm diâmetro interno, filme de 0,25 μm ; temperatura de injetor: 250 °C, fluxo de 1 mL $\cdot\text{min}^{-1}$, gás de arraste He 6.0; forno: 40 °C por 2 min, aquecimento até 65 °C a 3 °C por min, manutenção a 65 °C por 1 min, aquecimento até 120 °C a 20 °C por min, manutenção por 1 min.

Para a obtenção dos percentuais adsorvidos pela fibra, à área correspondente ao pico do benzeno ou do tolueno no cromatograma do controle (o que não passou pela coluna) foi atribuído o percentual de 100 %. As áreas correspondentes aos eluatos do mesmo ensaio (dos quatro ciclos) foram utilizadas para calcular os percentuais adsorvidos.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os rendimentos, em porcentagem mássica, obtidos para cada faixa de granulometria. Observou-se que os maiores rendimentos ocorreram nas duas faixas de menores granulometrias, ou seja, entre 0,212 mm e 0,425 mm (43 %) e inferiores a 0,212

mm (26 %), perfazendo 69 % do total. A predominância dessas granulometrias decorre das características físicas e químicas da fibra e também das condições de moagem.

Especificação peneira (mm)	Rendimento (%)
$x > 1,00$	2,57
$0,850 < x < 1,00$	2,16
$0,600 < x < 0,850$	8,31
$0,425 < x < 0,600$	15,36
$0,212 < x < 0,425$	43,16
Base < 0,212	25,56
TOTAL	97,13

Tabela 1 — Rendimentos obtidos em cada faixa granulométrica

Fonte: A autora (2017).

Não foram estudados os comportamentos de adsorção da fibra com granulometrias superiores a 1,00 mm, pela dificuldade de se trabalhar com esses materiais, que se apresentaram na forma de bastões tornando difícil o preenchimento da coluna. Além disso, apresentam área de contato menor em relação às outras granulometrias. A fibra de menor granulometria, como esperado, apresentou a maior compactação na coluna, o que gerou certa dificuldade devido à maior pressão.

No processo de moagem e de separação das partículas observou-se uma perda de quase 3 % da massa inicial, considerada aceitável, já que a poeira gerada pela moagem, assim como pequenas partículas que são perdidas durante a manipulação do material são esperadas.

Na Figura 5 estão ilustrados os eluatos após percolação em coluna de aço inox (4 ciclos).



Figura 5 — Eluatos coletados após percolação em coluna de aço inox

Fonte: Arquivo da autora (2017).

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam exemplos de cromatogramas do benzeno e do tolueno, respectivamente, obtidos em GC-FID. Correspondem ao controle e a eluatos da coluna contendo fibra com granulometria entre 0,600 mm e 0,850 mm obtidos nos quatro ciclos.

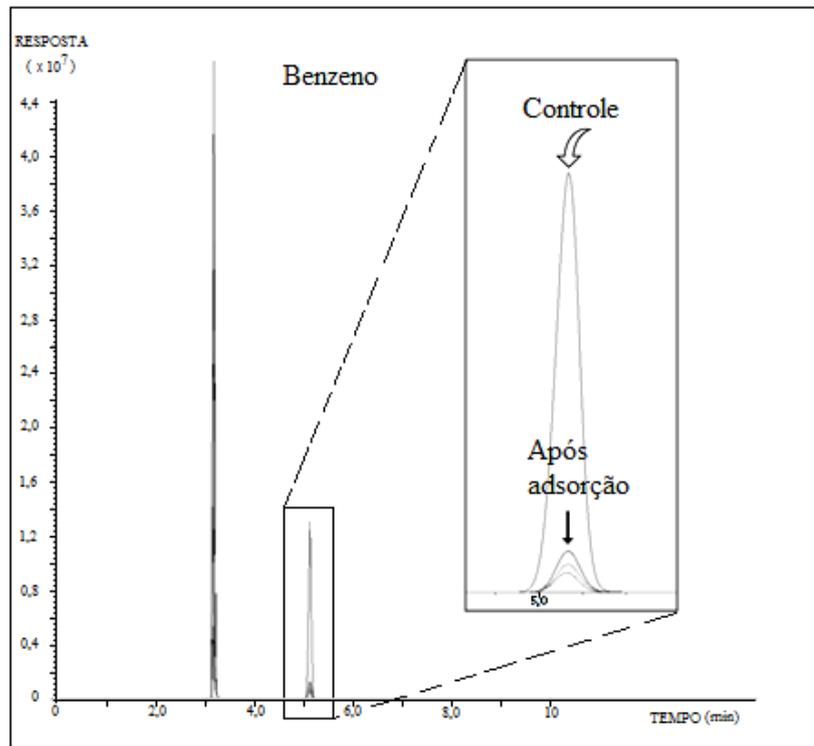


Figura 6 — Cromatograma do benzeno detectado por meio do GC-FID, na granulometria $0,600 < x < 0,850\text{mm}$

Fonte: GC-FID (2017).

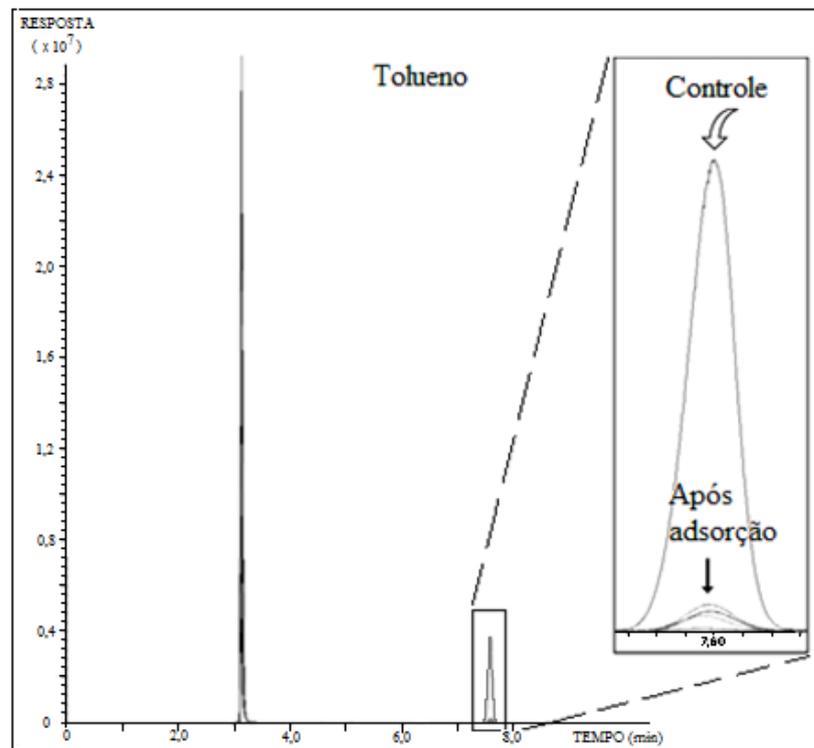


Figura 7 — Cromatograma do tolueno detectado por meio do GC-FID, na granulometria $0,600 < x < 0,850\text{ mm}$

Fonte: GC-FID (2017).

Observa-se que os resultados das análises, tanto do benzeno quanto do tolueno, apresentam a área sob a curva do controle muito superior às áreas sob as curvas das

substâncias após percolação, indicando a boa capacidade adsorptiva dessas duas substâncias pela fibra.

A pequena diferença observada visualmente entre as áreas correspondentes aos quatro ciclos foi confirmada pela análise de variância (significância de 5 %). Os resultados confirmaram que as diferenças não são estatisticamente significativas, para uma mesma granulometria de fibra. Por essa razão, para a análise do efeito da granulometria, os valores de adsorção utilizados foram obtidos por meio do cálculo da média dos quatro ciclos da mesma faixa granulométrica.

A Figura 8 apresenta os resultados comparativos de adsorção de benzeno e de tolueno nas fibras das diferentes granulometrias.

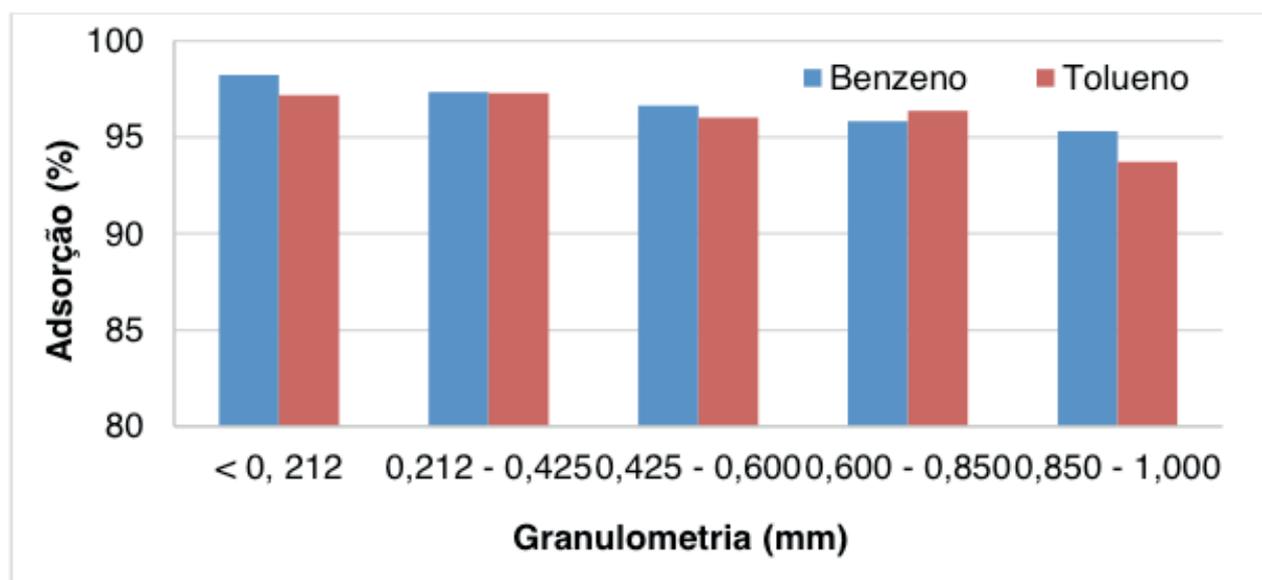


Figura 8 — Efeito da granulometria da fibra do coco verde na adsorção do benzeno e do tolueno

Fonte: A autora (2017).

Embora visualmente se observe uma tendência a uma redução na adsorção com o aumento da granulometria, a análise de variância revelou não haver diferença estatisticamente significativa na adsorção do benzeno quando se variou a granulometria da fibra. Entretanto, quanto ao tolueno, a fibra de granulometria entre 0,850 mm e 1,000 mm apresentou adsorção significativamente menor.

Vale ressaltar que, a princípio, o objetivo do projeto era analisar a adsorção de todos os BTEX pela fibra de coco verde de diferentes granulometrias. Porém, o detector utilizado na separação cromatográfica em fase gasosa foi o FID (Detector por Ionização em Chama), que apresentou uma sensibilidade insuficiente para detecção do etilbenzeno e dos xilenos residuais após adsorção pela fibra. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de as solubilidades de ambas as substâncias, em água, serem extremamente baixas (Tabela 2). A detecção do etilbenzeno e dos xilenos seria possível se a análise fosse realizada por meio de cromatografia em fase gasosa com detecção por meio de espectrômetro de massas (GC-MS).

Componentes	Solubilidade em água (g·L ⁻¹)
Benzeno	0,73
Tolueno	0,47
Etilbenzeno	0,15
O-xileno	0,20

Tabela 2 — Valores próximo de solubilidade de cada componente em água

Fonte: *National Institutes of Health – Pubchem- Open Chemistry Database*

Bezerra (2017) estudou a remoção de benzeno e do tolueno em solução aquosa por adsorção utilizando carvão ativado (CA) produzido a partir do lodo doméstico, projeto que partiu do mesmo objetivo e mesmo fundamento (adsorção), mas com um adsorvente distinto, também para diminuir a quantidade destes compostos tóxicos no meio ambiente. Entretanto, com detecção por meio da absorção no UV. Os resultados obtidos por esse pesquisador foram satisfatórios uma vez que, foi obtida uma remoção de 75 % de benzeno e 83 % de tolueno, em ensaios realizados em batelada, enquanto que, em coluna de leito fixo, obteve-se uma remoção de 87 % para o benzeno e 91 % para o tolueno.

Os resultados de adsorção obtidos por Bezerra (2017) em coluna são comparáveis aos deste trabalho, mas a fibra de coco verde mostrou-se ainda mais eficaz na adsorção, já que em granulometrias inferiores a 0,820 mm, foi superior a 95 %.

4 | CONCLUSÕES

A classificação granulométrica realizada mostrou que as partículas de granulometrias inferiores a 0,425 mm (69 %) predominam na fibra moída, resultado que decorre das condições de moagem e das características físicas e químicas do material.

As análises estatísticas (Anova) mostraram que não houve diferença significativa ao nível de significância de 5 % entre as adsorções de benzeno nos quatro ciclos realizados. Esse mesmo resultado foi observado na adsorção do tolueno.

As análises estatísticas (Anova) mostraram que não houve diferença significativa ao nível de significância de 5 % entre as adsorções do benzeno, em todas as granulometrias utilizadas (acima de 95 % de adsorção). Quanto ao tolueno, somente a fibra com granulometria entre 0,850 mm e 1,00 mm apresentou adsorção estatisticamente menor (93,7 %), comparada com as demais (acima de 95 %).

Os altos percentuais de adsorção do benzeno e do tolueno, assim como a pouca influência da granulometria na adsorção, indicam que não há vantagem em separar fibras com granulometrias inferiores a 0,850 mm para despoluir água contendo benzeno e tolueno, uma vez que isto acarretaria em custo, sem melhora na eficácia adsortiva. Além disso, o fato de se trabalhar com fibras de diferentes granulometrias em uma mesma coluna reduziria o problema da compactação, apresentado pelo material com granulometria inferior a 0,212 mm, e tornaria o material mais permeável.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, J. K. D. A. **Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção utilizando carvão ativado produzido a partir do lodo doméstico**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2017.
- CUENCA, M. A. G.; MARTINS, C. R.; JUNIOR, L. A. D. J. Estatística da produção. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica (Ageitec)**, 2017. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/coco/arvore/CONT000fo7hz6ox02wyiv8065610d6ky3ary.html>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4^a. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 853 p.
- FUNDACENTRO - FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. **Efeitos da exposição ao benzeno para a saúde**. São Paulo: [s.n.], 2012. 52 p.
- GALIANGO, C. S. et al. **Adsorção de hidrocarbonetos presentes em água contaminada com gasolina utilizando fibra de coco verde**. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, p. 75. 2015.
- IBGE. Produção Agrícola Municipal. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, 2016. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613#notas-tabela>>. Acesso em: 09 nov. 2017.
- IDOETA, P. A. **Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico**. BBC Brasil, 17 fev. 2014. Disponível em: <http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/02/140207_coco_reciclagem_abre_pai>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- LOPES, V. S. D. M. **Avaliação preliminar da contaminação por BTEX, em água subterrânea de poços tubulares, no município de Natal/RN**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 70. 2011.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 1469, de 29 de dezembro de 2000**. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa). [S.l.]. 2000.
- NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Open Chemistry Database. **Pubchem**. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pccompound?cmd=search>>. Acesso em: 2017 dez. 12.
- OLIVEIRA, L. I. D.; LOUREIRO, C. D. O. **Contaminação de aquíferos por combustíveis orgânicos em Belo Horizonte: Avaliação preliminar**. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, p. 10, 1998.
- ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. **Adsorption by powders and porous solids. Principles, Methodology and Applications**. Londres: [s.n.], 1999.
- SAKATA, S. K. et al. **Development of a static headspace gas chromatographic/mass spectrometric method to analyze the level of volatile contaminants biodegradation**. Journal of Chromatography A, 1048, Setembro 2004. 37-71.
- SILVA, F. L. D. N. et al. **Determinação de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos em gasolina comercializada nos postos do estado do Piauí**. Química Nova, v. 32, p. 56-60, 2009. ISSN 1.

APLICABILIDADE DE NANOCOMPÓSITOS A BASE DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS

Data de aceite: 19/06/2020

Data de submissão: 13/03/2020

Anne Caroline da Silva Rocha

Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa
Mano
Rio de Janeiro - RJ
lattes.cnpq.br/2533304856179383

Livia Rodrigues de Menezes

Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa
Mano
Rio de Janeiro - RJ
lattes.cnpq.br/8963454147023051

Emerson Oliveira da Silva

Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa
Mano
Rio de Janeiro - RJ
lattes.cnpq.br/3549505081029919

RESUMO: O polilactídeo (PLA) é um polímero biodegradável e biocompatível, sendo considerado como um dos biopolímeros mais promissores em aplicações industriais. Contudo suas baixas propriedades térmicas e mecânicas inviabilizam seu uso na substituição de polímeros sintéticos incentivando a

utilização de nanopartículas a fim de melhorar tais propriedades. Foram obtidos nanocompósitos poliméricos de PLA, a partir da técnica de casting, com diferentes nanopartículas de carbono (Nanotubo, Grafeno e Fulereno) modificadas com octadecilamina (ODA) em seu estado isolado e em sistemas ternários destas partículas nas concentrações de 0,01%, 0,03% e 0,09%. Após a obtenção os sistemas foram analisados por transmitância e teste em alimentos. Os resultados indicam que a presença das nanopartículas de carbono modificadas foi capaz de elevar a mecânica da matriz de PLA. Os sistemas contendo 0,03% das nanoestruturas exibiram melhores resultados em ambas as análises. Nos sistemas ternários verificou-se um efeito sinérgico que pode decorrer da melhor dispersão destas partículas.

PALAVRAS-CHAVE: Poli(ácido láctico); nanopartículas de carbono; embalagens alimentícias.

APPLICABILITY OF NANOCOMPOSITES BASED ON CARBON NANOPARTICLES IN FOOD PACKAGING

ABSTRACT: The poly(lactic acid) or polylactide (PLA) is a biodegradable and biocompatible compostable polymer, being

considered as one of the most promising biopolymers in industrial applications. However, its low thermal and mechanical properties make it an unfeasible option to replace synthetic polymers encouraging the use of nanoparticles to improve such properties. Therefore, nanoparticles of carbon (carbon nanotubes, graphene and fullerene) modified with octadecylamine (ODA) in their isolated state, and ternary systems of these particles in concentrations of 0.01%, 0.03%, and 0.09% were obtained from PLA polymer nanocomposites. After obtaining them, these systems were analyzed by techniques of transmittance and food testing. The presence of modified carbon nanoparticles was able to increase the mechanical resistance of the PLA matrix. The systems with 0.03% of the nanostructures showed better results in both analyzes. In verified ternary systems, there is a synergistic effect that can occur with the best dispersion of these particles.

KEYWORDS: Poly(lactic acid); carbon nanoparticles; food packaging.

1 | INTRODUÇÃO

A necessidade de transporte e armazenamento de alimentos é compreendida desde os primórdios, quando eram utilizados vidros e restos de animais mortos para esta finalidade. Desse cenário, surge a necessidade de produção de materiais que sejam capazes de armazenar e transportar o alimento, garantindo-lhes uma maior integridade até o seu destino final (KAETSU; ANDREOLI, 2015). A grande utilização de polímeros sintéticos nesta área dá-se devido às boas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira. No entanto, grande parte dos materiais plásticos utilizados para produção de embalagens alimentícias são provenientes de fontes não renováveis, ocasionando problemas ambientais como poluição, superacumulação em aterros sanitários, alto consumo de energia, além do fato de que, apresentam em alguns casos uma dificuldade adicional em sua reciclagem, uma vez que ocasionalmente os mesmos são contaminados com produtos químicos e microrganismos. A fim de se eliminar resíduos urbanos e promover uma conscientização ecológica, tem-se buscado utilizar materiais que retenham as mesmas propriedades, mas que também beneficiem ao meio ambiente (ATTARAN; HASSAN; WAHIT, 2015).

Perante o exposto, nações internacionais têm intensificado a pesquisa no que tange a substituição de polímeros sintéticos por materiais biodegradáveis, atendendo a um apelo ambiental e de saúde pública. Contudo, propriedades térmicas e mecânicas inferiores aos materiais utilizados convencionalmente representam um entrave na comercialização dos polímeros biodegradáveis. Nesta perspectiva, a adição de nanoestruturas possibilita o alcance de propriedades similares aos materiais sintéticos utilizados na fabricação de embalagens alimentícias (MAHALIK; NAMBIAR, 2010).

O aspecto óptico das embalagens é outro fator de grande relevância no que tange sua aplicação uma vez que, a visualização do alimento é importante para identificar se há danos e alterações de cor dos mesmos. Além disso, a visualização do alimento pode ser uma importante estratégia de *marketing* para incentivar a compra do produto embalado. Assim, uma solução a ser avaliada é a possibilidade de obtenção de sistemas de alta transparência

para tal finalidade (SIMMONDS; SPENCE, 2019).

A nanotecnologia aplicada a materiais tem sido alvo de estudos por utilizar menores quantidades de materiais e, ainda assim, conseguir um alto desempenho devido ao uso de nanoestruturas, que possuem ao menos uma de suas dimensões nanométricas, apresentando alta área superficial, garantindo uma maior quantidade de interações entre a matriz e a carga. Na ciência, o século XX foi marcado pela descoberta de nanoestruturas de carbono, representando um avanço para tecnologia, com a descoberta de nanoestruturas do fulereno, grafeno e nanotubo de carbono (CNT). Apenas as modificações no tamanho dessas estruturas de carbono já promovem uma grande variação de suas propriedades, o que refletiu no aumento do interesse para utilização e modificação dessas nanoestruturas (ROY; SENGUPTA; BHOWMICK, 2012).

A aplicação das nanoestruturas de carbono se estende para sua utilização em embalagens ativas e inteligentes, nos quais os nanotubo de carbono e o grafeno são amplamente utilizados, pelo fato dos mesmos promoverem não só uma maior resistência mecânica, mas também por apresentarem propriedades antimicrobianas e serem capaz de acompanhar e verificar a condição do alimento durante o seu transporte e armazenamento (VELICHKOVA *et al.*, 2017).

2 | METODOLOGIA

O método de preparação dos filmes de nanocompósitos foi por vazamento ou *casting*. As nanoestruturas de carbono modificadas com octadecilamina em diferentes concentrações foram dispersas em clorofórmio em banho de ultrassom a uma potência de 80 W durante 30 min. Em seguida, foi adicionado o PLA e o sistema permaneceu sob agitação magnética a temperatura ambiente por 60 min. Após a solubilização, as dispersões foram secas por 168 h em capela a temperatura ambiente conforme demonstrado na Figura 1. Foram criadas siglas para representar os sistemas obtidos. As siglas selecionadas foram: Cn (para nanotubo de carbono); Gr (para grafeno); Ful (fulereno) e ODA (para octadecilamina). As amostras obtidas foram separadas em dois grupos: simples (0,01%, 0,03% e 0,09%) e ternários (0,03% e 0,09%), conforme descrito na Tabela 1.

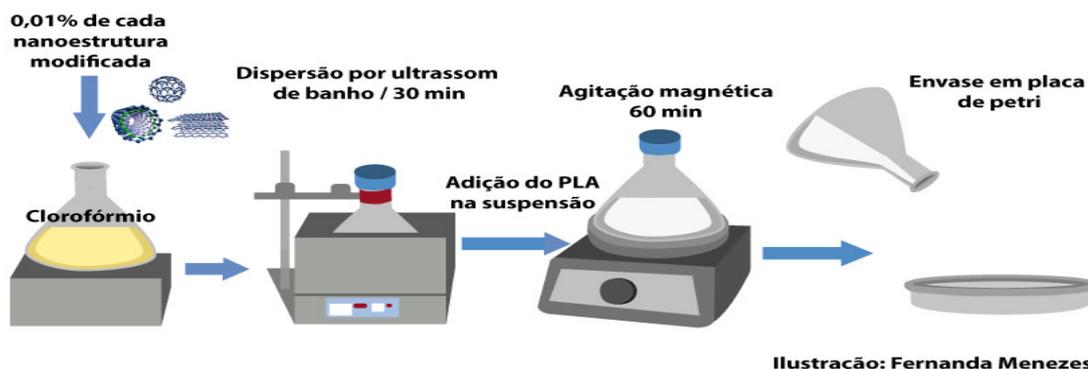


Figura 1: Ilustração da obtenção das amostras.

NOMENCLATURA	NANOPARTICULAS
SIMPLES	
PLA PURO	-
PLA + 0,01% Cn	Nanotubo de carbono - ODA
PLA + 0,01% Gr	Grafeno - ODA
PLA + 0,01% Ful	Fulereo - ODA
PLA + 0,03% Cn	Nanotubo de carbono - ODA
PLA + 0,03% Gr	Grafeno - ODA
PLA + 0,03% Ful	Fulereo - ODA
PLA + 0,09% Cn	Nanotubo de carbono - ODA
PLA + 0,09% Gr	Grafeno - ODA
PLA + 0,09% Ful	Fulereo - ODA
TERNÁRIOS	
PLA + 0,03%(Cn+Gr+Ful)	Nanotubo de carbono-ODA + Fulereo – ODA + Grafe- no - ODA
PLA + 0,09%(Cn+Gr+Ful)	Nanotubo de carbono -ODA + Fulereo – ODA + Grafe- no - ODA

Tabela 1: Nomenclatura das amostras.

Fonte: Elaborado pela autora.

Análise de transmitância UV-Vis: No intento de se verificar alterações na transparência do filme mediante a inserção das nanoestruturas, realizou-se a análise de UV-Vis com suporte para filmes em aparelho Varian, modelo Cary 100 Conc, a 25 °C, com velocidade 48 e varredura e 300 nm/min, resolução de 2 nm na faixa de comprimento de onda de 900 a 200 nm.

Teste em alimentos: Para verificar a interação do filme nanocompósito com o alimento foram realizados os testes de Perda de Massa e Acidez total titulável. O alimento escolhido

para tal foram as Uvas Itália.

Perda de massa: Para a realização deste teste, as uvas foram mantidas durante 23 dias em temperatura ambiente (25 °C) e foram pesadas ao longo do procedimento. As uvas foram inseridas em um coletor universal *estéril* descartável de 80 mL (Ever Care) e cobertas com os filmes nanocompósitos de acordo com a Figura 27. Os resultados obtidos foram expressos em porcentagem, em relação a massa inicial e final das frutas (LUCENA *et al.*, 2017).

A equação utilizada para o cálculo de perda de massa está descrita abaixo:

$$PM(\%) = \left(\left(\frac{Mi - Mf}{Mi} \right) \cdot 100 \right)$$

No qual,

PM = Porcentagem de perda de massa parcial;

Mi = Massa inicial da amostra;

Mf = Massa final da amostra.

Determinação da acidez total titulável: Para este procedimento foi realizado uma trituração com o auxílio do pistilo e filtração das uvas a fim de se obter o suco da fruta. A análise de Acidez total titulável foi realizada por titulação de neutralização, onde foi recolhida uma alíquota de 10 mL do suco da fruta e adicionado a ele 90 mL de água destilada. A titulação foi realizada utilizando hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L⁻¹ e 3 gotas de fenolftaleína a 1%, como indicador. Os resultados foram expressos em porcentagem (%) de ácido tartárico. Este procedimento foi realizado no primeiro e último dia do teste (LUCENA *et al.*, 2017).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de transmitância UV-Vis

Os resultados da análise de transmitância UV-Vis (Figura 2a e b) demonstram que a adição das nanopartículas de carbono em concentrações de até 0,03% não é capaz de alterar a transparência dos sistemas. Esse comportamento reflete possivelmente a baixa concentração e boa dispersão destas partículas que possibilita uma passagem dos feixes de luz de forma mais uniforme sem que os eventos de absorção e reflexão fossem fortes o suficiente para alterar a transmissão de luz através dos materiais. Como única exceção deste grupo destaca-se o sistema contendo 0,01% dos Nanotubos que exibiu uma leve perda de transparência, contudo a mesma não se apresentou significativa.

Os sistemas contendo 0,09% das nanoestruturas (Figura 2c) já exibe um comportamento distinto, onde os sistemas contendo apenas uma nanopartícula exibiram perdas de transmitância de cerca de 15%, indicando que nesta concentração possivelmente há uma perda de dispersão gerando pontos de aglomeração que funcionam como pontos de espalhamento e absorção da luz levando assim a perda de transmissão de seu feixe (LIN *et*

al., 2010; MIN; KIM; CHANG, 2011; FELFEL *et al.*, 2018; XIONG *et al.*, 2018).

Todavia o sistema ternário 0,09% (Figura 2c), contendo as três nanopartículas simultaneamente, exibe um padrão distinto. Este resultado indica que na presença simultânea das três partículas há, provavelmente, uma melhoria da dispersão e distribuição destas partículas em detrimento dos sistemas contendo apenas uma partícula isoladamente. Esse comportamento já foi relatado em outros sistemas contendo mais de um tipo de nanopartícula e é justificada por alguns autores com base na possibilidade das partículas de mais fácil dispersão agir de modo a separar as partículas com maior potencial de agregação. Outra possibilidade indicada por alguns autores seria a repulsão eletrostática das partículas entre si quando coexistentes no mesmo sistema. Entretanto, no presente sistema, devido à ausência de cargas no modificador utilizado, o mais provável é que o primeiro evento descrito tenha ocorrido.

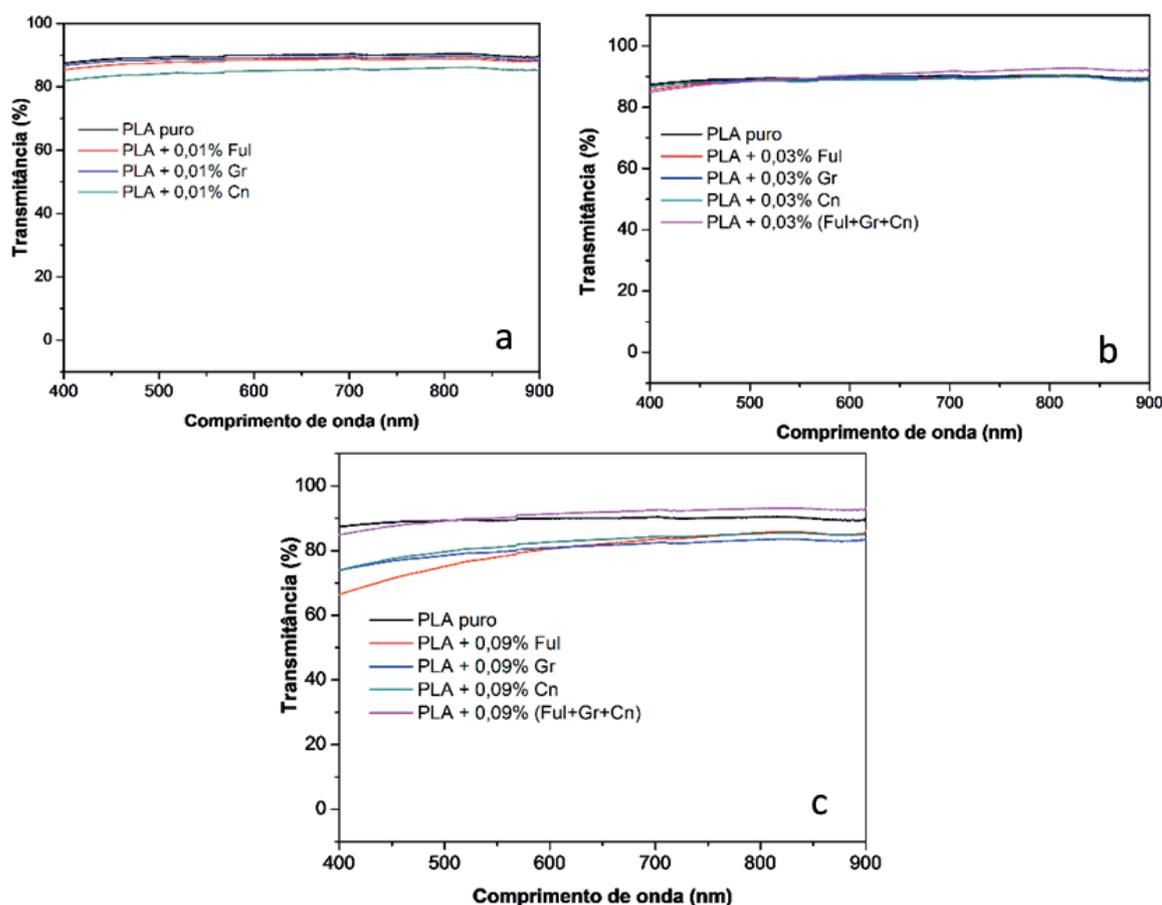


Figura 2: Curvas de transmitância UV-Vis.

3.2 Teste em alimentos

Este ensaio foi realizado apenas com as amostras de PLA puro, ternário com 0,03% de nanoestruturas (T003) e ternário com 0,09% (T009), pois foram os sistemas que apresentaram melhores resultados nas análises térmicas e na análise termomecânica. A amostra S/Rec (sem recobrimento) representou o grupo controle deste ensaio. A perda de massa nas uvas está associada principalmente à perda de água ou outras substâncias voláteis causadas pelo amadurecimento ou degradação do fruto. Com isso, a perda de massa do recipiente é

proporcional com a capacidade de passagem de vapor de água pelo filme nanocompósito, ou a perda de substâncias voláteis. Nesses dois casos, a perda dessas substâncias pode acarretar mudanças na textura e no odor característico das uvas.

Ao se analisar a Figura 3a, verifica-se que o PLA puro propicia uma redução de perda de massa considerável quando comparada ao sistema sem recobrimento, que apresenta uma perda de massa de, aproximadamente, 15,4% após 23 dias enquanto que o sistema de PLA puro apresenta uma perda de massa de, aproximadamente, 5,4%. Caracterizando, uma redução de 10% na perda de massa, para o mesmo período. Lucena *et al.*, (2017) atribui esse efeito ao fato de que polímeros biodegradáveis apresentam uma boa barreira a gases.

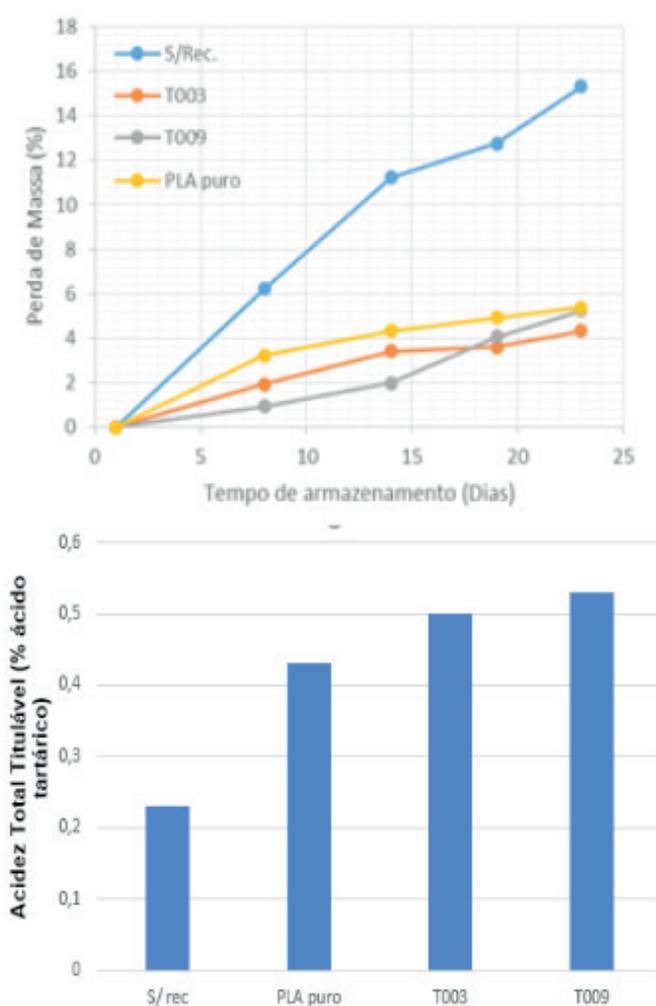


Figura 3: Gráfico de perda de massa (a) e acidez total titulável (b).

Em relação ao T009, tem-se que até o 14º dia, o mesmo apresenta a menor taxa de perda de massa dentre as amostras, chegando a possuir uma perda de massa 3,4% menor que o T003, que pode estar relacionado a uma quantidade superior de nanopartículas no sistema, agindo como barreira. No entanto, do 14º dia em diante, a taxa de aumento de perda de massa do T009 aumenta a valores superiores ao do T003, chegando no 23º dia com a perda de massa idêntica ao PLA puro. Esse fenômeno pode ser explicado devido à

barreira gerada pelas nanoestruturas, impedindo a saída de componentes voláteis como o gás etileno, onde após um determinado período a acumulação desse gás faz com que o mesmo seja catalisador do processo de degradação da uva, aumentando assim a perda de massa (Figura 4).

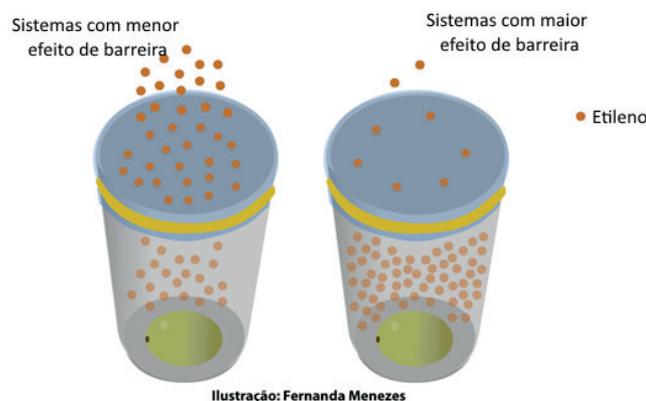


Figura 4 – Ilustração do processo de acúmulo de etileno no ensaio de degradação das uvas

Ao se observar os sistemas ternários, verifica-se que ambos apresentam uma redução na perda de massa com relação ao sem recobrimento, o que pode estar associado a uma possível elevação da propriedade de barreira dos sistemas contendo as nanoestruturas. Dentre os ternários, o T003 apresenta os melhores resultados de perda de massa, o que pode estar interligado a sua melhor dispersão das nanopartículas, que geram caminhos tortuosos na matriz polimérica, dificultando a passagem de moléculas de gases.

Algumas características dos frutos como sabor, aroma e acidez estão associadas aos ácidos orgânicos dissolvidos nos vacúolos das células dos frutos, podendo estar puros ou dissolvidos com glicosídeos, sais e ésteres. Parte desses ácidos é consumida ao longo do tempo pelo processo de respiração devido à oxidação no ciclo dos ácidos tricarbóxicos ou de sua transformação em açúcares, associada ao aumento do metabolismo (LUCENA *et al.*, 2017). As uvas adquiridas para este ensaio apresentaram um teor de 0,85% de ácido tartárico, estando dentro dos valores exigidos pela legislação brasileira que permite um teor máximo de 0,90 % de ácido tartárico (LUCENA *et al.*, 2017).

De acordo com o processo de respiração, tem-se uma diminuição da concentração dos ácidos orgânicos. Ao se analisar os resultados obtidos na Figura 3b, verifica-se uma redução percentual de ácido tartárico nas uvas em todos os sistemas, entretanto verifica-se uma maior tendência em diminuir essa perda nos sistemas ternários. Esse comportamento pode estar associado à capacidade desses sistemas em minimizar a perda de água das uvas, corroborando com os resultados obtidos no teste de perda de massa. Esses resultados demonstram que tanto o PLA puro quanto os filmes nanocompósitos apresentam uma menor perda de ácidos orgânicos, prolongando o tempo de prateleira das uvas.

4 | CONCLUSÃO

Os resultados de transmitância indicam que as nanopartículas de carbono modificada com ODA em concentrações até 0,03% não altera a transparência da matriz de PLA. Sistemas contendo 0,09% já exibem uma perda de transparência para os sistemas contendo cada tipo de partícula isoladamente. O sistema ternário 0,09% contendo simultaneamente o fulereno, grafeno e nanotubo de carbono já apresentam melhores transparências indicando que a presença de diferentes geometrias favorece o processo de dispersão destas nanopartículas. Mediante os resultados obtidos pelo teste em alimentos, verificou-se que os sistemas ternários contribuem de forma a diminuir a perda de massa do alimento, o que pode estar relacionada à atuação das nanopartículas como barreira à saída de água e componentes voláteis. De acordo com a acidez total titulável, os filmes nanocompósitos são capazes de aumentar o tempo de prateleira das uvas. Os sistemas obtidos apresentam-se promissores para a aplicação em embalagens alimentícias.

REFERÊNCIAS

- ATTARAN, S.A.; HASSAN, A.; WAHIT, M.U. Materials for food packaging applications based on bio-based polymer nanocomposites: A review. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [S.l.], v. 30, n.2, p. 143-173, 2015.
- KAETSU, S. T.; ANDREOLI, T. P. Análise de embalagens de produtos alimentícios que marcaram a lembrança dos consumidores. **Caderno de Administração**, [S.l.], v.23, n.2, 2015.
- LUCENA, C. A. A.; COSTA, S. C.; ELEAMEN, G. R. A.; MENDONÇA, E. A. M.; OLIVEIRA, E. E. Desenvolvimento de biofilmes à base de xilana e xilana/gelatina para produção de embalagens biodegradáveis. **Revista Polímeros**, [S.l.], v.27, p. 35-41, 2017.
- MAHALIK, A. M.; NAMBIAR, A. N. Trends in food packaging and manufacturing systems and technology. **Trends in Food Science e Techonology**, [S.l.], v. 21, n.3, p. 117-128, 2010.
- ROY, N.; SENGUPTA, R.; BHOWMICK, A. K. Modifications of carbon for polymer composites and nanocomposites. **Progress in Polymer Science**, [S.l.], v. 37, n.6, p. 781-819, 2012.
- SIMMONDS, G.; SPENCE, C. Food imagery and transparency in product packaging. In: Multisensory Packaging. **Palgrave Macmillan, Cham**, 2019. p. 49-77.
- VELICHKOVA, H.; KOTSILKOV, S.; IVANOV, E.; KOTSILKOVA, R.; GYOSHEV, S.; STOIMENOV, N.; VITANOV, N. K. Study on the release of carbon nanoparticles of different size and shape from nanocomposite poly(lactic) acid film into food simulants, **Food Additives & Contaminants: Part A**, 2017.

DEGRADAÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO POR Nb_2O_5 SUPOSTADO EM SiO_2

Data de aceite: 19/06/2020
Data de submissão: 06/03/2020

Thais Delazare

Instituto de Química, Universidade Federal do
Rio de Janeiro
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/5201929896839964>

Rodrigo da Silva Neu

Instituto de Química, Universidade Federal do
Rio de Janeiro
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3493720675439734>

Emerson Schwingel Ribeiro

Instituto de Química, Universidade Federal do
Rio de Janeiro
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/4215461340747792>

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo desenvolver um catalisador de Nb_2O_5 suportado em SiO_2 obtido a partir da casca de arroz para a degradação fotocatalítica do corante azul de metileno. O catalisador foi obtido a partir da calcinação da sílica previamente obtida da casca de arroz em solução aquosa de oxalato amoniacal de nióbio. O catalisador foi caracterizado por espectroscopia no infravermelho (IV), difração de raios X (DRX) e fluorescência de

raios X (FRX). O processo de degradação do corante foi realizado em duas bateladas distintas simultaneamente, uma na ausência de luz e outra com irradiação, por 120 min. Os experimentos obtiveram como resultado a degradação do azul de metileno pelo catalisador.

PALAVRAS-CHAVE: Fotocatálise; Óxido de nióbio; Óxido de silício; Corante.

DEGRADATION OF BLUE METHYLENE DYE BY Nb_2O_5 SUPPORTED IN SiO_2

ABSTRACT: This work aims to develop a Nb_2O_5 catalyst supported on SiO_2 obtained from rice husk for the photocatalytic degradation of methylene blue dye. The catalyst was obtained by calcining silica previously obtained from the rice husk in an aqueous solution of ammonium niobium oxalate. The catalyst was characterized by infrared spectroscopy (IR), X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). The dye degradation process was carried out in two separate batches simultaneously, one in the absence of light and the other with irradiation, for 120 min. The experiments resulted in the degradation of methylene blue by the catalyst.

KEYWORDS: Photocatalysis; Niobium oxide; Silicon dioxide; Dye.

1 | INTRODUÇÃO

Os corantes sintéticos são amplamente utilizados na indústria têxtil, na alimentícia, na fabricação de papel, na indústria cosmética, na indústria do couro, de móveis e de produtos plásticos. Contudo, durante o processo de tingimento, uma grande parte desses corantes é descartada nos corpos hídricos. Só a indústria têxtil contribui com 54% da quantidade de corantes lançados em efluentes. Os corantes são considerados perigosos a saúde humana e ao meio ambiente, devido a sua toxicidade e a resistência a degradação (ZANONI; YAMANAKA, 2016; KATHERESAN; KANSEDO; LAU, 2018; MADHAV et al., 2018)

Segundo a Resolução 357/2005 do CONAMA (2005), órgão que regulamenta os limites máximos permitidos em efluentes líquidos, não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais.

As tecnologias empregadas para a remoção de corantes envolvem tratamentos químicos, físicos e biológicos, como utilização de algas, fungos e enzimas, coagulação e eletrocoagulação, processos oxidativos avançados (POAs), oxidação eletroquímica e adsorção (UMPIERRES et al., 2017; KATHERESAN; KANSEDO; LAU, 2018; NIDHEESH; ZHOU; OTURAN, 2018). Dentre elas, pode-se destacar os POAs, em especial, a fotocatalise heterogênea, cujo processo se baseia na ativação de um semicondutor, considerado mais eficiente comparado aos demais POAs (JANICKI et al., 2012; MADHAV et al., 2018).

O processo de fotocatalise heterogênea envolve principalmente a transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução de uma superfície de um semicondutor na irradiação de luz com um comprimento de onda apropriado (VISWANATHAN, 2018). Neste processo, ocorre uma reação química na qual radicais hidroxila e/ou oxigenados são formados, atacando a molécula do corante e degradando-a em CO_2 e H_2O . No entanto, a remoção ocorre não somente por processo fotocatalítico, mas também por processo de adsorção sobre a superfície de um sólido (HASHEMZADEH; RAHIMI; GAFFARINEJAD, 2013; GONÇALVES, 2017).

Óxidos metálicos, como TiO_2 , ZnO , WO_3 e Nb_2O_5 são semicondutores conhecidos por suas propriedades fotocatalíticas e pela eficiência na degradação de moléculas orgânicas (RIENTE; NOËL, 2019). Para este trabalho, foi escolhido o pentóxido de nióbio (Nb_2O_5). Este óxido é um semicondutor com um largo *band gap* em torno de 3,4 eV, apresenta propriedades ácidas, estabilidade térmica, química e tem sido utilizado com sucesso na degradação de vários compostos orgânicos descritos na literatura (RIENTE; NOËL, 2019; TRAN et al., 2019; WOLSKI; WALKOWIAK; ZIOLEK, 2019). Além disso, o Brasil destaca-se como maior produtor e exportador de nióbio, sendo detentor de mais de 90% das reservas mundiais exploráveis deste metal (BRASIL; 2019).

A fim de aumentar a eficiência na remoção dos corantes, utilizando os processos de adsorção e fotodegradação, será utilizado um óxido conhecido pelas suas capacidades adsorptivas, como SiO_2 combinado ao Nb_2O_5 . O Nb_2O_5 disperso na superfície de SiO_2 ou

incorporada em sua rede tem sido utilizado em sistemas aplicados a sensores eletroquímicos e catálise heterogênea. Contudo, poucos estudos tem usado esta combinação entre os dois óxidos como adsorventes (UMPIERRES et al., 2017).

Para este trabalho, o dióxido de silício (SiO_2), também conhecida como sílica foi obtido a partir da casca de arroz. Considerando que a casca apresenta cerca de 15% em massa de SiO_2 , este óxido pode ser obtido por alguns procedimentos: por calcinação direta, por calcinação precedida de tratamento químico e por via sol-gel. A sílica da casca de arroz é considerada uma alternativa à sílica comercial, devido à facilidade de obtenção e reduzir a geração de resíduos produzidos pela indústria de beneficiamento de arroz (FERNANDES; SABINO; ROSSETTO, 2014; FERREIRA *et al.*, 2015)

Neste trabalho, foi desenvolvido um catalisador de óxido de nióbio (Nb_2O_5) suportado em sílica (SiO_2) obtida a partir da casca de arroz, um resíduo da indústria de beneficiamento de arroz, para a degradação do corante azul de metileno (AM). Este catalisador apresenta como vantagem ter um baixo custo e ser ambientalmente limpo.

2 | PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Obtenção de SiO_2 a partir da casca de arroz

As cascas foram tratadas com solução de HCl 10 % (v/v) na proporção de 1:9 (casca : solução) sob agitação constante para por 1 h solubilizar a matéria orgânica. A seguir, as cascas foram lavadas com água corrente e o último enxague foi realizado com água destilada. As cascas lavadas foram levadas para estufa à 100 °C por 12 h e a seguir levadas para calcinação em mufla a 600 °C por 2 h (FERNANDES; SABINO; ROSSETTO, 2014; FERREIRA et al., 2015; BAKAR; YAHYA; GAN, 2016). A caracterização da sílica foi feita a partir das análises de espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (IVTF), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX).

2.2 Obtenção do Catalisador de Nb_2O_5 Suportado em SiO_2

O catalisador foi obtido a partir da impregnação úmida de uma solução de oxalato amoniacal de nióbio em SiO_2 a partir da casca de arroz na proporção em massa de 1:5 $\text{Nb}_2\text{O}_5:\text{SiO}_2$, seguido de calcinação a 500 °C por 2 h. A caracterização do catalisador foi feita a partir das análises de espectroscopia de ultravioleta-visível por reflectância difusa (DRS) espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (IV), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX).

2.3 Ensaios de Fotodegradação do corante

Para o experimento de degradação do corante, foram realizadas duas bateladas distintas simultaneamente. Cada batelada foi submetida a duas condições: um béquer em ausência de luz e outro béquer com irradiação de luz, por 120 min, sob agitação constante. Uma massa de 0,10 g de catalisador, conforme obtido no item 2.2, foi adicionada a um béquer

contendo 50,0 mL de uma solução do corante AM 2,5 mg.L⁻¹. Uma alíquota da solução em cada béquer foi analisada por espectroscopia de ultravioleta-visível (UV-vis) para determinar a concentração do corante ao final do experimento.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise por DRS, o catalisador apresentou absorção máxima entre 200 e 380 nm. Para que ele seja ativado e seja capaz de agir como fotocatalisador, a fonte de luz deve irradiar em comprimento de onda da região do ultravioleta. Para o experimento, foi utilizada a fonte de luz halógena

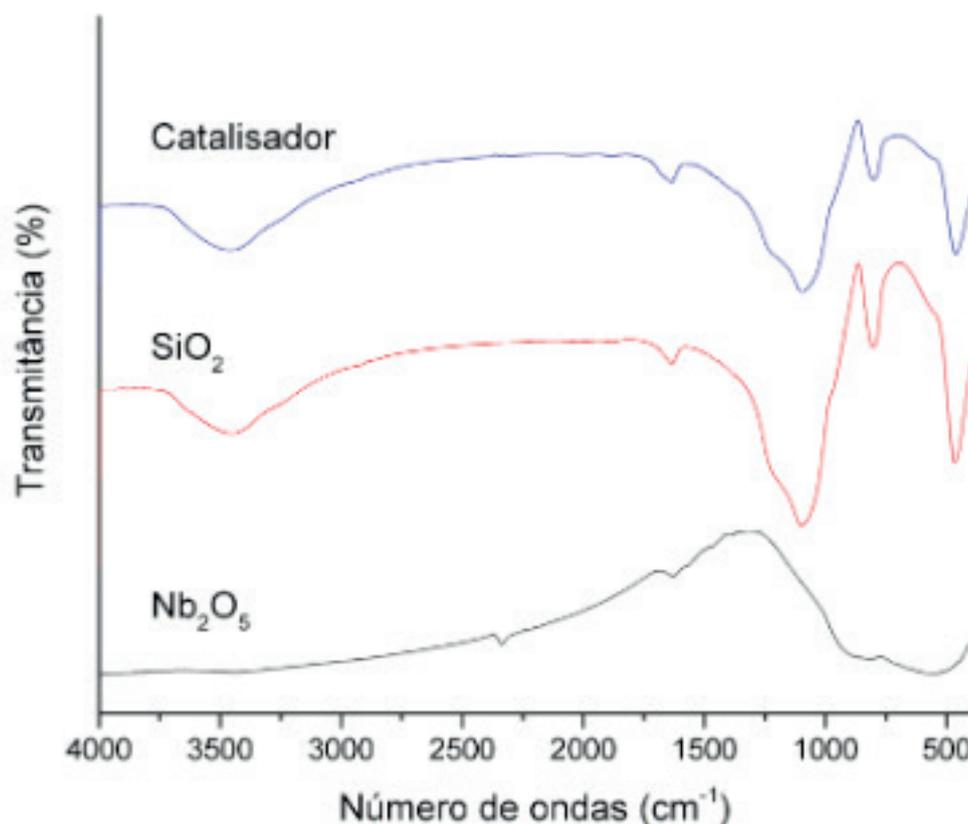
Os resultados obtidos pela análise por FRX do catalisador estão descritos na Tabela 1.

% da fração em massa dos elementos expresso como óxidos	
SiO ₂	78,1199
Nb ₂ O ₅	21,5123
Outros elementos	0,3678

Tabela 1. Resultado da análise por FRX do catalisador.

A partir destes resultados, o teor de Nb₂O₅ no catalisador corresponde a aproximadamente 22 %, concordante com a proporção utilizada para a obtenção do catalisador de 1:5 (Nb₂O₅:SiO₂).

Os espectros de absorção na região do infravermelho (IV) do SiO₂, Nb₂O₅ e do catalisador estão apresentados na Figura 1.



O espectro de IV (Figura 1) apresenta bandas em 3445 cm^{-1} correspondente a deformação axial da ligação Si-OH, em 1105 cm^{-1} com ombro em 1178 cm^{-1} correspondente à deformação axial assimétrica da ligação Si-O-Si, em 798 cm^{-1} correspondente à deformação axial simétrica da ligação Si-O-Si e 464 cm^{-1} correspondente à deformação angular da ligação O-Si-O presentes na sílica da casca de arroz e no catalisador (MUSIĆ; FILIPOVIĆ-VINCEKOVIĆ; SEKOVANIĆ, 2011). Para o Nb_2O_5 , uma banda larga em 887 cm^{-1} e 542 cm^{-1} , correspondentes à deformação axial assimétrica da ligação O-Nb-O e à deformação axial simétrica da ligação Nb-O-Nb, respectivamente (CASTRO et al., 2015). No catalisador, a diminuição da intensidade das bandas características de SiO_2 sugerem uma interação entre o Nb_2O_5 e o SiO_2 (PRASETYOKO et al., 2008).

Os difratogramas de raios X (DRX) de SiO_2 , Nb_2O_5 e do catalisador estão apresentados na Figura 2.

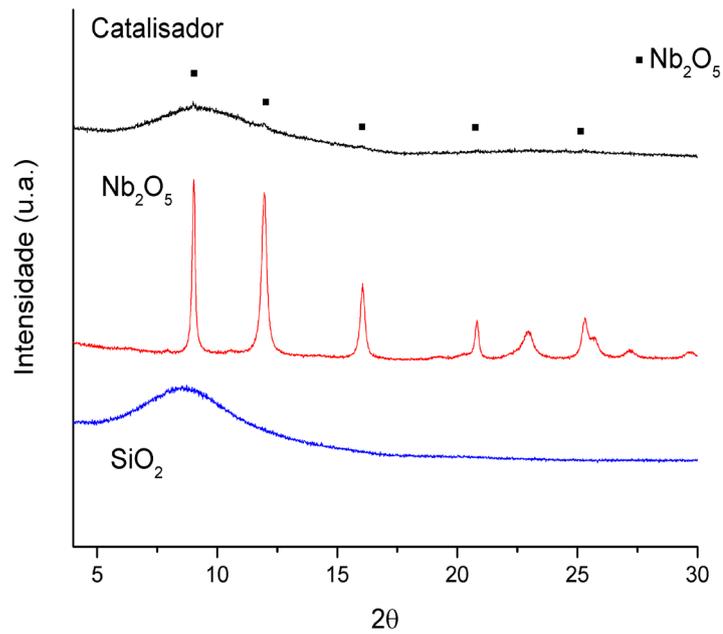


Figura 2. Difratoograma de raios X de SiO_2 , Nb_2O_5 e do catalisador.

A presença de picos largos no difratograma (Figura 2) de SiO_2 caracteriza uma estrutura amorfa, enquanto no Nb_2O_5 o perfil dos picos correspondem a uma fase pseudo-hexagonal pura (Fase-TTJCPDS, 28-317) (ZHOU et al., 2008). Já no catalisador, os picos marcados correspondem à presença do Nb_2O_5 impregnado ao SiO_2 .

O resultado do experimento na ausência de luz está apresentado na Figura 3.

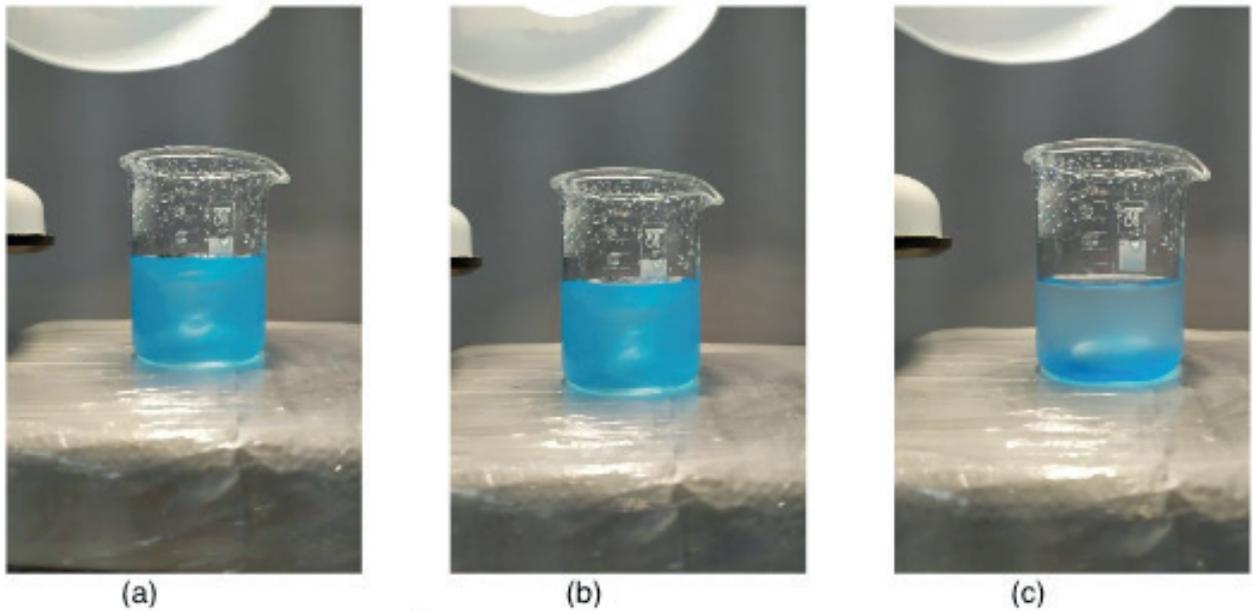


Figura 3. Solução de AM 2,5 mg.L⁻¹ antes do processo de remoção no escuro (a), após 120 min (b) e após 180 min.

Para o experimento na ausência de luz (Figura 3) por 120 min, a concentração de AM na solução foi de 0,44 mg.L⁻¹, removendo 82,4 % do corante. Após 180 min, a concentração de AM na solução foi de 0,44 mg.L⁻¹.

O resultado do experimento com irradiação de luz está apresentado na Figura 4.

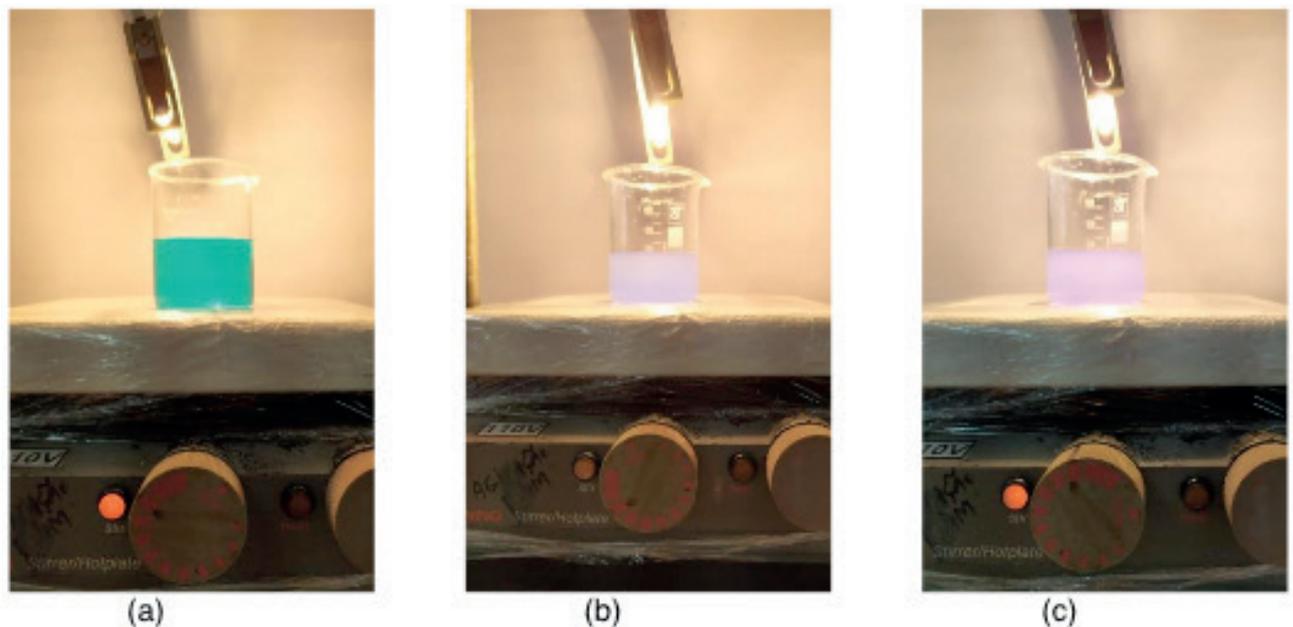


Figura 4. Solução de AM 2,5 mg.L⁻¹ antes do processo de remoção com irradiação de luz(a), após 120 min (b) e após 180 min.

Para o experimento com irradiação de luz halógena (Figura 4) por 120 min, a concentração de AM na solução foi de 0,11 mg.L⁻¹, removendo 95,6 % do corante. Após 180

min, a concentração de AM foi de 0,10 mg.L⁻¹.

Nos dois experimentos, a concentração de AM após 120 min se manteve constante devido a saturação do catalisador. O catalisador na ausência de luz removeu o corante através do processo de adsorção e com irradiação de luz, ocorreu o processo de adsorção e fotodegradação. O catalisador demonstrou ser mais eficiente na remoção do corante na presença de luz, devido a ativação do catalisador para o processo de fotodegradação.

Segundo Zhao e colaboradores (2012), a degradação do AM ocorre devido a imobilização das moléculas do corante através da ligação com os sítios ácidos do Nb₂O₅ na superfície do catalisador, que atacam as mesmas pelos elétrons fotoinduzidos e os buracos, gerando CO₂ e H₂O.

4 | CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados com o catalisador proposto, foi concluído que ocorreu a remoção do corante AM, através do processo de fotodegradação. O catalisador de Nb₂O₅ em SiO₂ mostrou ser eficiente na degradação do AM sob luz, além de ser uma alternativa barata, a partir do aproveitamento do resíduo da indústria de beneficiamento de arroz e do uso do nióbio, presente em abundância no Brasil, maior produtor e exportador mundial do metal. Além disso, devido a capacidade de adsorção, o catalisador pode vir a ser promissor para reuso.

REFERÊNCIAS

BAKAR, R. A.; YAHYA, R.; GAN, S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. **Procedia Chemistry**, v. 19, p. 189–195, 2016.

BRASIL. **Agência Nacional de Mineração**. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.; – Brasília: ANM, 2019.

CASTRO, D. C. et al. Synthesis and Characterization of Mesoporous Nb₂O₅ and Its Application for Photocatalytic Degradation of the Herbicide Methylviologen. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 27 p.

FERNANDES, L.; SABINO, M. G.; ROSSETTO, H. L. Method of extration of silica from rice hull. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 160–163, 2014.

FERREIRA, C. S. et al. Rice Husk Reuse in the Preparation of SnO₂/SiO₂Nanocomposite. **Materials Research**, v. 18, n. 3, p. 639–643, jun. 2015.

GONÇALVES, M. C. P. Aplicação de Nb₂O₅ comercial para descoloração do corante azul de metileno pelo processo de fotocatalise. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 11, 2017.

HASHEMZADEH, F.; RAHIMI, R.; GAFFARINEJAD, A. Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Rhodamine B Dyes by Niobium Oxide Nanoparticles Synthesized Via Hydrothermal Method. v. 1, n. 7, p. 9,

2013.

JANICKI, V. et al. Optical and Structural Properties of Nb₂O₅–SiO₂ Mixtures in Thin Films. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 17, p. 3650–3657, abr. 2012.

KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. Efficiency of Various Recent Wastewater Dye Removal Methods: A Review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 4676–4697, ago. 2018.

MADHAV, S. et al. A Review of Textile Industry: Wet Processing, Environmental Impacts, and Effluent Treatment Methods. **Environmental Quality Management**, v. 27, n. 3, p. 31–41, 1 mar. 2018.

MUSIĆ, S.; FILIPOVIĆ-VINCEKOVIĆ, N.; SEKOVANIĆ, L. Precipitation of Amorphous SiO₂ Particles and Their Properties. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 1, p. 89–94, mar. 2011.

NIDHEESH, P. V.; ZHOU, M.; OTURAN, M. A. An Overview on the Removal of Synthetic Dyes from Water by Electrochemical Advanced Oxidation Processes. **Chemosphere**, v. 197, p. 210–227, 1 abr. 2018.

PRASETYOKO, D. et al. Characterization and Catalytic Performance of Niobic Acid Dispersed over Titanium Silicalite. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2008, p. 1–12, 2008.

RIENTE, P.; NOËL, T. Application of Metal Oxide Semiconductors in Light-Driven Organic Transformations. **Catalysis Science & Technology**, v. 9, n. 19, p. 5186–5232, 2019.

TRAN, S. B. T. et al. Influence of Support Acidity of Pt/Nb₂O₅ Catalysts on Selectivity of CO₂ Hydrogenation. **Catalysis Letters**, v. 149, n. 10, p. 2823–2835, out. 2019.

UMPIERRES, C. S. et al. Mesoporous Nb₂O₅ /SiO₂ Material Obtained by Sol–Gel Method and Applied as Adsorbent of Crystal Violet Dye. **Environmental Technology**, v. 38, n. 5, p. 566–578, 4 mar. 2017.

VISWANATHAN, B. Photocatalytic Degradation of Dyes: An Overview. **Current Catalysis**, v. 7, n. 2, p. 99–121, 9 jul. 2018.

WOLSKI, L.; WALKOWIAK, A.; ZIOLEK, M. Photo-Assisted Activation of H₂O₂ over Nb₂O₅ – The Role of Active Oxygen Species on Niobia Surface in Photocatalytic Discoloration of Rhodamine B. **Materials Research Bulletin**, v. 118, p. 110530, out. 2019.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.

ZHOU, Y. et al. Preparation and Spectroscopic Properties of Nb₂O₅ Nanorods. **Journal of Luminescence**, v. 128, n. 8, p. 1369–1372, ago. 2008.

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE $Ba_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3\pm\delta}$ PARA PREPARAÇÃO DE CAMADA FUNCIONAL DO ELETRODO CATÓDICO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO IT-SOFC

Data de aceite: 19/06/2020

Mariana Lima

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - São Paulo – SP

Everton Bonturim

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - São Paulo – SP

Marco Andreoli

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - São Paulo – SP

Nelson Batista de Lima

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - São Paulo – SP

Emília Satoshi Miyamaru Seo

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais - São Paulo – SP
Centro Universitário Senac – Grupo de Pesquisa em Sustentabilidade – São Paulo - SP

E-mail para correspondência: esmmyseo@ipen.br ou emilia.smseo@sp.senac.br

RESUMO: A demanda mundial por energia elétrica é uma tendência crescente, desta

maneira há necessidade de diversificar e buscar por novas matrizes energéticas. Insere-se neste contexto, as células a combustível de Óxido Sólido de Temperatura Intermediária (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells - IT-SOFC), que converte diretamente a energia de reações químicas em água e em energia elétrica e também em energia térmica (calor). As células a combustível do tipo IT-SOFC por utilizarem materiais cerâmicos em sua concepção, são capazes de suportarem temperaturas até 800°C e sem perderem suas propriedades físicas, químicas, elétricas e microestruturais. O presente trabalho tem como objetivo a síntese e a caracterização do material particulado de $Ba_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3\pm\delta}$ – BSCF (variando os valores de x iguais a 0,4; 0,6 e 0,5), visando sua utilização para fabricação de componente catódico de IT-SOFC. O particulado de BSCF foi obtido por meio do método de complexação por EDTA – Citratos, que consiste nas reações de estado sólido e reações em fase líquida. A reação em fase líquida consiste no processo de complexação em que os agentes quelantes atraem os íons metálicos presentes na solução precursora. A caracterização do material particulado BSCF foi realizada por difração de raios X (DRX), Espectroscopia de raios X por

energia dispersiva (EDS), Análise Química por Fluorescência de raios X (identificação dos elementos constituintes na composição), Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV (observação de morfologia e do tipo de aglomeração das partículas), e Picnometria por Gás Hélio (medidas de densidade real) e BET. Os resultados da caracterização dos particulados para a confecção do material catódico do BSCF apresentaram adequados para fabricação de componente catódico de IT-SOFC.

PALAVRAS CHAVE: Células a combustível, Cerâmico, BSCF, IT-SOFC, Energia.

OBTAINING AND CHARACTERIZATION OF $Ba_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3\pm\Delta}$ FOR PREPARATION OF THE FUNCTIONAL LAYER OF THE CATHODIC ELECTRODE OF IT-SOFC FUEL CELL

ABSTRACT: The global demand for energy it is a growing and irreversible tendency. Therefore, there is a need to diversify and search for new energetic matrixes. Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells - IT-SOFC are part of this context, which converts chemical energy directly in water, electric energy and thermal energy (heat) . IT-SOFC fuel cells type uses ceramic materials in their design, and due this fact they are able to operate in temperatures up to 1073K (800°C) without losing their physical, chemical, electrical and microstructural properties. This present work aims the synthesis and characterization of $Ba_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3\pm\delta}$ – BSCF particulate matter (x=0.4 and 0.6), and making a parallel with Bonturim’s paper (2012) in which x = 0.5, thus, aiming their use for manufacturing IT-SOFC cathode components. The BSCF particulate have been obtained by the complexation method with EDTA - citrates, which consists of solid and liquid state reactions The liquid phase reaction consists in complexing process wherein chelating agents attracts metal ions present in the precursor solution. The characterization of the BSFC particulate have been given by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence chemical analysis (identification of the components in the composition), Secondary Electron Microscopy - SEM (observation of morphology and type of agglomeration of the particles) and gas helium picnometry (real density measurements). The results of the characterization of particulates used in the produtcion of BSCF cathodes are appropriate for manufacing IT-SOFC components.

KEYWORDS: fuel cells, ceramic, BSCF, IT-SOFC, energy.

1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia de células a combustível (CaC) vem crescendo nos últimos 40 anos, devido ao desenvolvimento na área de novos materiais e principalmente a crescente demanda por fontes de energias limpas, eficientes e descentralizadas (LINARDI, 2010). Segundo Sigh (2004), as vantagens da CaC são a possibilidade de construção modular, o baixo nível de ruídos, produção simultânea de energia elétrica e térmica, baixa restrição quanto à localização e elevada eficiência de conversão, dependendo do tipo de CaC.

A CaC que operam em temperaturas classificadas como intermediárias e, confeccionadas com componentes cerâmicos, conhecidas como Células a Combustível de Óxido Sólido de Temperatura Intermediária (da sigla em inglês, *ITSOFC: Intermediate Temperature Solid*

Oxide Fuel Cell), devido à sua temperatura de operação que ocorre entre 500 a 800°C, traz vantagens como a flexibilidade de utilização de materiais em sua fabricação, assim baixando o custo de fabricação (SIGH, 2004; SHAO, 2012).

Segundo Teraoka *et. al* (1984) o BSCF provém de um material que dá base para essa composição, o composto de estrutura cristalina do tipo perovskita conhecido como $\text{SrCoO}_{3-\delta}$. Há muitos compostos ternários de fórmula ABO_3 , cujos cátions A e B diferem consideravelmente no tamanho, cristalizam-se em uma estrutura de arranjo cristalino do tipo perovskita, assim essa estrutura cristalina pode ser considerada uma estrutura derivada da estrutura cúbica de face centrada (CFC), onde o cátion A, maior, de valência +2 e o oxigênio, íon de valência -2, formam juntos um reticulado do tipo CFC. Já o cátion B, menor, de valência +4, ocupa os locais octaédricos na disposição do retículo CFC e tem somente átomos de oxigênio como seus vizinhos mais próximos.

Em busca por materiais cerâmicos que contribuam e atendam às características necessárias, o BSCF é um dos materiais considerado mais adequado para o funcionamento do cátodo da IT-SOFC, se sintetizada com composição química, microestrutura, atividade catalítica, condutividade iônica e eletrônica e coeficientes de expansão térmica, fundamentais para o bom desempenho da CaC de acordo com TAI *et al.* (1995); SHAO *et al.* (2014).

Com o objetivo de contribuir para os estudos destes materiais, o presente trabalho tem por finalidade a síntese e caracterização química, física e microestrutural do material particulado $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Co}_y\text{Fe}_{1-y}\text{O}_{3\pm\delta}$ – BSCF (variando os valores de x iguais a 0,4; 0,6 e 0,5), afim de compara-los.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para preparação dos particulados ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Co}_y\text{Fe}_{1-y}\text{O}_{3\pm\delta}$) foi utilizando Método de Complexação dos Citratos - EDTA. Para melhor entendimento é apresentado um esquema simplificado constituído de síntese e caracterização de particulados (Figura 1).

2.1 Materiais

Para síntese e caracterização do $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Co}_y\text{Fe}_{1-y}\text{O}_{3\pm\delta}$ foram utilizadas técnicas descritas acima, e utilizando as seguintes matérias primas:

- Água Destilada.
- Ácido Etilenodiamino tetra-acético (EDTA) – $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$ – com pureza de 99,998 % (Aldrich);
- Ácido Cítrico – $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ – P.A. (Merck);
- Nitrato de Bário - $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ - com pureza maior que 99,9 % (Aldrich);
- Nitrato de Estrôncio - $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ - com pureza maior que 99,9 % (Aldrich);
- Nitrato de Cobalto hexahidratado - $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - com pureza maior que 99,9 % (Aldrich);
- Nitrato de Ferro nonahidratado – $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – com pureza maior que 99,9 %

- (Aldrich);

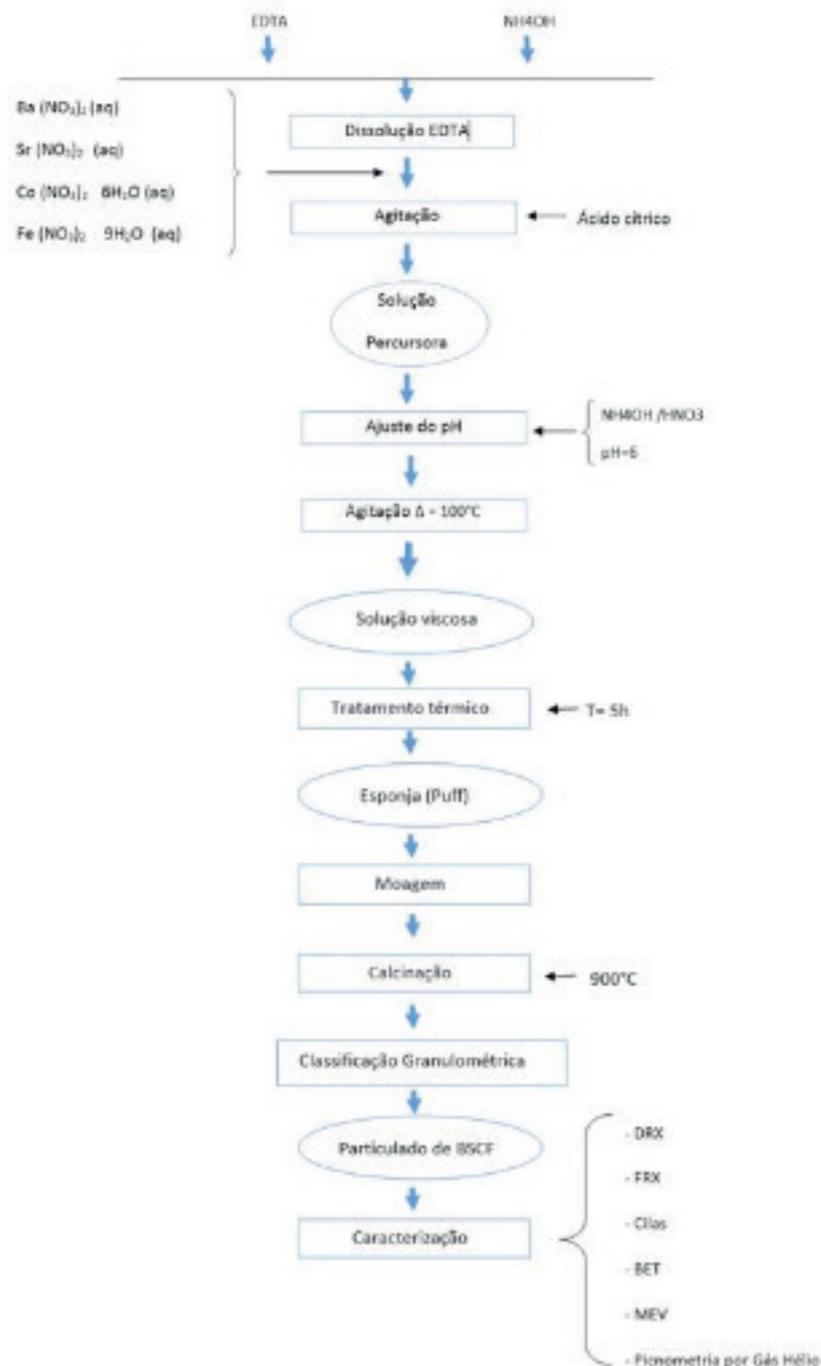


Figura 1 – Fluxograma processo de síntese via método citratos – EDTA para obtenção de particulado de BSCF.

2.2 Procedimento Experimental

O método de síntese do particulado de BSCF adotada no presente trabalho é baseado nas reações de estado sólido e reações em fase líquida (Figura 1). A reação em fase líquida consiste no processo de complexação em que os agentes quelantes atraem os íons metálicos presentes na solução precursora, portanto o método é conhecido como método de complexação por EDTA-citratos.

De acordo com a Figura 1, primeiramente faz-se a medição mássica dos reagentes de

interesse, no caso, os sais de nitrato dos respectivos cátions Ba (NO₃)₂; Sr (NO₃)₂; Co (NO₃)₂·6H₂O; Fe (NO₃)₃·9H₂O. As relações estequiométricas para síntese de Ba_xSr_(1-x)Co_{0,80}Fe_{0,20}O_{3±δ} – BSCF foram calculadas para os valores x igual a 0,4; 0,6 e 0,5. Na sequência, a medição dos agentes complexantes EDTA e ácido cítrico, na proporção 40:60 em massa e quantidade de NH₄OH e NHO₃ suficiente para ajuste do pH.

Em um béquer, o EDTA foi dissolvido com o Hidróxido de amônio - NH₄OH e a adição desta base foi realizada até que atinja a completa dissolução do EDTA. Em seguida, EDTA dissolvido em NH₄OH foram adicionados aos sais de nitratos solubilizados em água destilada, sob agitação. Posteriormente foi adicionada a quantidade de solução de ácido cítrico para completa mistura dos reagentes obtendo-se assim a solução percussora.

Na sequência, ocorreu o ajuste de pH da solução, de acordo com o valor de pH= 6, escolhido como padrão para a reação. De acordo com Shao *et al.*, (2012) e Patra *et al.*, (2011) a necessidade de controle de pH da solução é fundamental, pois influência no processo de síntese, devido a variações nas propriedades de complexação dos agentes utilizados.

Após a correção de pH a solução foi aquecida a (100°C), sob agitação afim de eliminar água presente na solução e posterior formação de solução viscosa (gel). Novamente a solução viscosa foi submetida ao tratamento térmico a 200°C por 5h em uma mufla, assim obtendo-se a esponja de BSCF. A esponja (puff) é desaglomerado, foi feita a classificação granulométrica e levado para a etapa de calcinação a temperatura a 900°C e por tempo de calcinação de 5h, obtendo-se o particulado de BSCF.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras foram separadas em decorrência das suas concentrações o particulado de Ba_xSr_{1-x}Co_yFe_{1-y}O_{3±δ} – BSCF, nas quais ocorre a variação do X, que é igual a 0,4; 0,6 e 0,5 ou A, B e C respectivamente.

Os resultados de análises termogravimétricas - ATG e análise térmica diferencial - ADT, representados na Figura 2 é referente ao material particulado obtido nas amostras BSCF 46 (A), BSCF 64 (B), BSCF 55(C). Esses gráficos apresentam a perda de massa decorrentes de reações de decomposição do material, em diferentes faixas de temperatura, o gráfico A e B são muito similares e o C apresenta algumas diferenças em relação as temperaturas diferentes em que ocorrem as reações, sendo assim observado nos gráficos da Figura 2.

De 25°C a 150°C, há uma pequena variação de perda de massa segundo a literatura decorrente da evaporação de água residual e umidade presente na amostra. De 150°C a 250°C, ocorreu perda de massa é menor que segundo a literatura é devido à decomposição do ácido cítrico utilizado como precursor na síntese realizada, com possível eliminação de CO e CO₂. Já no intervalo de 250°C a 450°C, ocorreu perda de massa muito acentuada (pico exotérmico), devido a diversos fatores como a liberação e eliminação de NO₂ proveniente dos grupos de nitratos e de CO₂. A esta faixa de temperatura inicia-se a reação de decomposição dos complexos de EDTA. De 450°C a 750°C, ocorreu perda de massa de aproximadamente 0,65 mg, decorrente da decomposição de nitratos à NO₂ e, devido a decomposição parcial da

estrutura polimérica formada pelo EDTA. De 750°C a 820°C, ocorreu outra perda de massa acentuada devido a decomposição total da estrutura polimérica formada pelo EDTA com liberação de carbono residual na forma de CO₂, além da volatilização de traços de nitrato na forma de NO₂.

A partir de 820°C a amostra se mostra estável sem perdas de massa.

Em relação as medidas de densidade apresentada na Tabela 1 as três amostras estão com os valores muito aproximado da densidade calculada por difração de raios X e pela ficha cristalográfica (PDF) do BSCF puro que é de Dx= 5,75, e o valor mais próximo é o do BSCF 55.

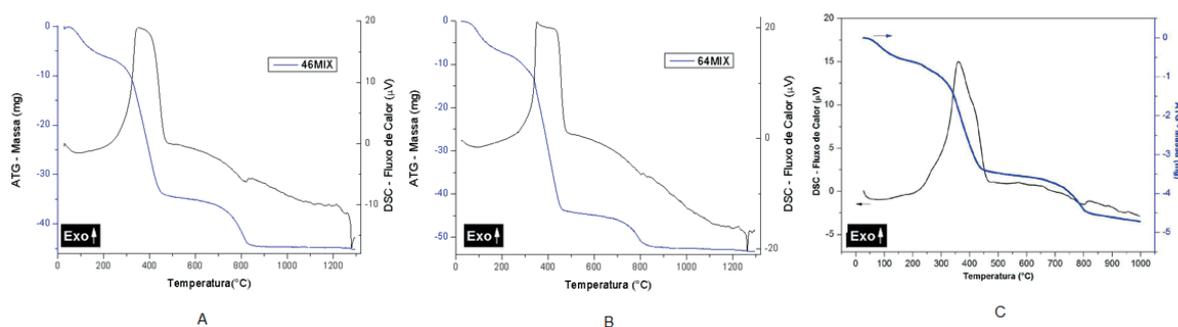


Figura 2 - Análise termogravimétrica (ATG) curva azul e Análise Térmica Diferencial – ATD curva preto. Das amostras BSCF 46 (A), BSCF 64 (B), BSCF 55(C).

Amostras	Densidade g.cm ⁻³	Área de superfície específica m ² . g ⁻¹	Diâmetro médio da partícula μm
BSCF 46	5,33 ±0,01	20,1 ±0,05	0,051
BSCF 64	5,42 ±0,01	14,6 ±0,05	0,071
BSCF 55	5,63 ±0,01	2,91 ±0,01	0,358

Tabela 1 - Resultados de densidade, área superficial específica e diâmetro médio das partículas de BSCF 46, BSCF 64 e BSCF 55, calcinados a 900 °C.

A amostra do material particulado BSCF 46 é o que apresenta melhor resultado em relação a área de superfície específica, já que é o que tem a maior área superficial de 20,1 m²/g. As três amostras foram moídas em moinho de alta energia por 4h, assim aumentando sua área superficial. De acordo com Vargas (2007) também é possível calcular através do BET o diâmetro médio da partícula utilizando a equação 1 mostra a relação entre a área de superfície específica e o tamanho das partículas:

$$D = 6 / (\rho_t S) \quad [1]$$

Onde:

D = diâmetro médio da partícula (μm)

ρ_t = densidade teórica do material (g/cm³)

S = área de superfície específica do material (m²/g)

As amostras BSCF 46, 64 e 55 apresentam diâmetro médio de 0,051 μm , 0,071 μm e 0,35 μm respectivamente, sendo compatível com o tamanho esperado.

As amostras de BSCF foram caracterizadas utilizando a análise por fluorescência de raios X - FRX. Os resultados da sua composição elementar são apresentados em porcentagem em massa (%massa), tomando como base a massa atômica dos elementos metálicos de interesse Ba, Sr, Co e Fe, das amostras de BSCF calcinadas 900°C por 5 h, de acordo com a Tabela 2.

	BSCF 46 (%)		BSCF 64 (%)		BSCF 55 (%)	
	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico
Ba	34,883	33,129	48,1221	46,882	40,20	40,21
Sr	29,084	31,703	18,832	19,940	25,66	25,65
Co	29,394	28,430	26,720	26,822	27,77	27,7
Fe	6,637	6,736	6,318	6,355	6,36	6,54

Tabela 2 – Composição química de BSCF.

A análise química é de extrema importância pois, podem ocorrer perdas de massa durante o processo de síntese, pré tratamento térmico e calcinação, os quais as amostras são submetidas, assim podendo influenciar nas características do material, como na formação de fase cristalina.

Os resultados da FRX reais das amostras estão muito próximos aos valores teóricos que foram calculados previamente, no qual o BSCF 55 foi o que apresentou a maior proximidade com o valor teóricos, fazendo com que essa pouca variação da porcentagem em massa garanta a formação da fase desejada do particulado.

As medidas de difração de Raios X apresentadas na Figura 3 foram feitas no difratômetro marca RIGAKU®, MULTIFLEX, utilizando radiação $\text{K}\alpha\text{Cu}$ (1,54178 Å) com identificação de fase: na faixa angular (2θ) de 10° a 90°, com passo de 0,02°/min. Os difratogramas referentes as amostras BSCF 46, BSCF 64 e BSCF 55, ficaram muito semelhantes, com picos nos mesmos pontos.

As fichas cristalográficas de números 75-426, referente a BSCF 46 e BSCF 64 e de número 01-075-6980 para BSCF 55, podemos afirmar que são estrutura cristalina cúbica do tipo Perovskita, mostrando a obtenção de composto BSCF de fase cristalina pura.

A maior parte do carbono residual são provenientes do processo de síntese do BSCF que utiliza reagentes orgânicos da reação de complexação, mas grande parte são eliminadas no processo de pré tratamento térmico e calcinação que chega a temperatura de 900°C. Assim os valores apresentando na tabela 3, referente as amostras representam menos de 0,20% para o BSCF 46, e 0,15% para o BSCF 65 e 55, considerada porcentagens pouco expressivas. Embora essa porcentagem pequena pode influenciar na formação de fases

secundárias como carbonatos CO_3^{2-} , termodinamicamente favoráveis na presença de íons livres de bário.

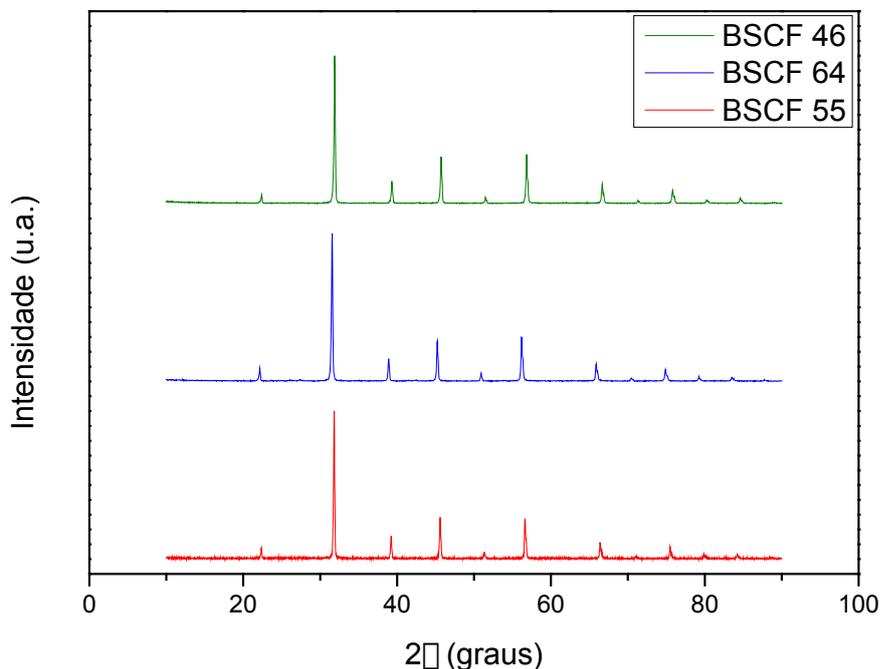


Figura 3 - Difratoogramas de raios X dos particulados de BSCF46, BSCF 64 e BSCF 55, calcinados a 900°C.

Amostras	Carbono (%)
BSCF 46	0,20 0,01
BSCF 64	0,15 0,01
BSCF 55	0,15 0,01

Tabela 3 – Teor de carbono residual das amostras BSCF 46, BSCF 64 e BSCF 55, calcinadas a 900 °C por 5h.

Nas imagens apresentadas na Figura 4, observamos a morfologia dos particulados de BSCF 46 e BSCF 64 foram avaliadas por imagem no tabletop microscope TM300 Hitach, e a amostra de BSCF 55 foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As amostras BSCF 46 (a, b) e BSCF 64 (c, d) apresentam tamanhos dos particulados bastante heterogêneos com média de 2,90 e 1,86 respectivamente, havendo a necessidade de maior tempo de moagem das amostras. Apresentam particulados aglomerado e densos. Na amostra BSCF 55 (e, f) sua morfologia apresenta uma formação característica de particulados em início de processo de sinterização, onde há presença de pescoços (ligações) entre partículas. Também vemos característica de partes de aglomerados densos e quebrados.

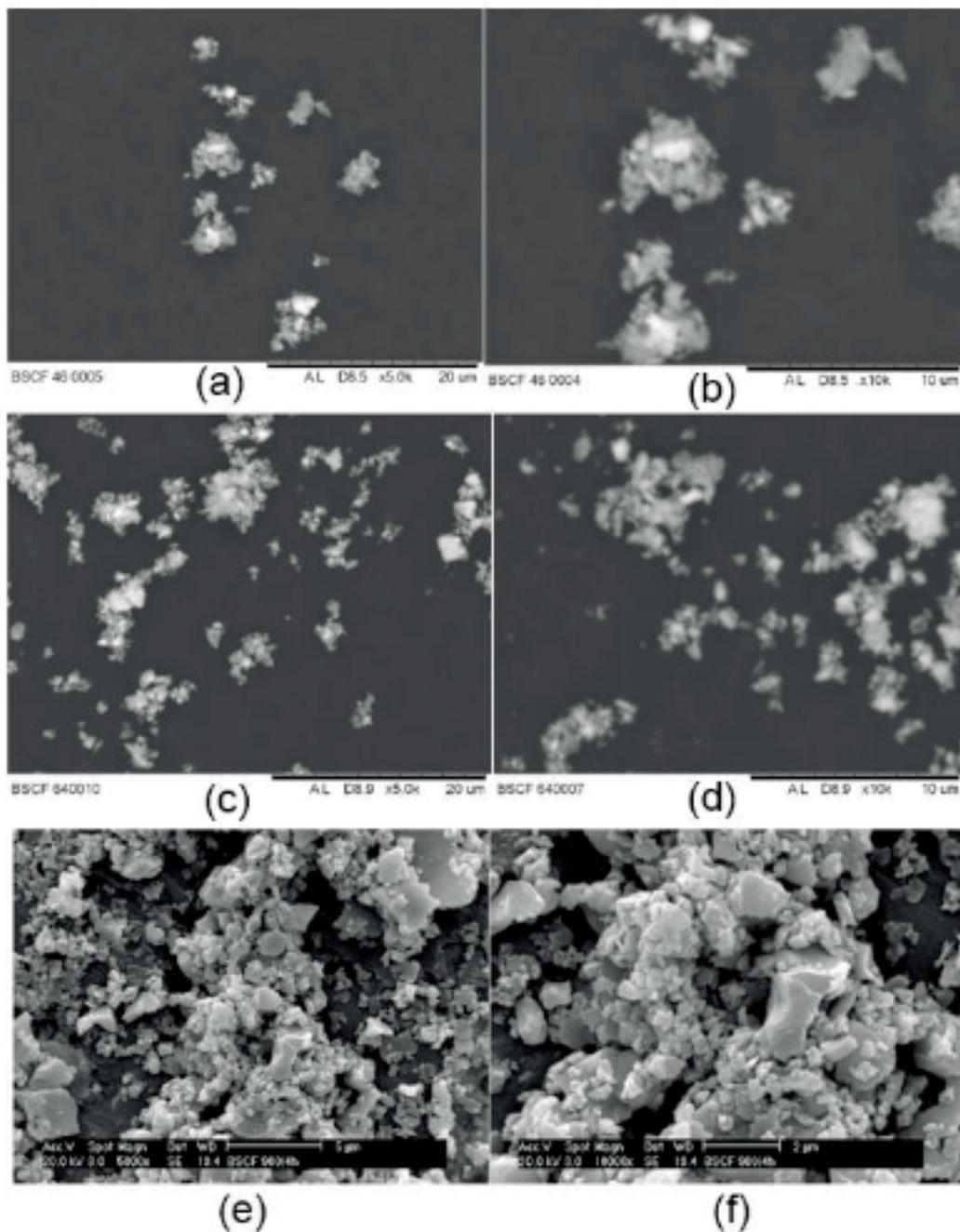


Figura 4 - Micrografias dos particulados de BSCF 46 (a,b), BSCF 64 (c,d) e BSCF 55 (e, f) calcinados a 900°C por 5h com moagem e peneirado. Magnificação de 5000x e 10000x, respectivamente.

4 | CONCLUSÕES

A rota de síntese baseada no método de Complexação dos Citratos – EDTA, tem se mostrado bastante viável, e as temperaturas e os tempos de calcinação estudados são adequados para formar a estrutura cristalina perovskita cubica desejada.

As características das composições de BSF estão dentro das propriedades adequadas para preparação de componentes catódicos de *ITSOFC*.

Há necessidade de maior tempo de moagem para que as amostras BSCF 46 e BSCF 65 fiquem do tamanho de grão desejado, menor que 1 μ m, e morfologia adequada.

REFERÊNCIAS

- LINARD, M. **Introdução à Ciência e tecnologia de células a combustíveis**. 1 ed. São Paulo: ARTLIBER Editora, 2010.
- LINDEN, D. **Handbook of Batteries and Fuel Cells**. New York, N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- PATRA, H. et al. Effect of process parameters on combined EDTA-Citrate synthesis of Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-d} perovskite. **Powder Technol.**, v. 209, p. 98-104, 2011.
- SHAO, Z. P. et al. **Advanced synthesis of materials for intermediate temperature solid oxide fuel cells**. Progress in Materials Science, v. 57. P 804-874, 2014.
- SIGH, P. ; MINH, N. Q. **Solid oxide fuel cells. Technology status. Int. J. Appl. Ceram. Tec .**, v.1., n. 1,p.5-15,2004.
- SUN, C. ; RUI, R. ; ROLLER, J . **Cathode materials for solid oxide fuel cell: a review** . Solid state Electrochem. Doi 10.1007/s10008-009-0932-0, v,14 p 1125-114,2009. Disponível em:< <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10008-009-0932-0#page-1>> . Acesso em: 15 de Ago. 2014.
- TAI, L. W. et al. Structure and electrical properties of La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}FeyO₃. Part 1: The system La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{1-y}FeyO₃. **Solid State Ionics**, v. 76, p. 259-271, 1995.
- TERAOKA, Y. et al. Oxygen-sorptive properties and defect structure of perovskite-type oxides. **Chem. Lett.**, p. 893-896, 1984.
- UNDESA. **World Population Prospects: the 2008 revision; executive summary**. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), 2009.
- VARGAS, R. A. **Síntese e caracterização de manganito de neodímio dopado com estrôncio utilizado como catodo em Células a Combustível de Óxido Sólido de Temperatura Intermediária**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, São Paulo.
- WENDT, H. ; GÖTZ, M. ; LINARDI, M. **Tecnologia de células a combustível**. Institut für Chemische Technologie - Technische Universität Darmstadt - Petersenstraße 20 - 64287 Darmstadt – Alemanha. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP - Cidade Universitária - Rua R, 400 - 05422-970 - São Paulo – SP. Química Nova, 23(4). 2000.

ESTUDO DA FIBRA DA URTIGA E DO ALGODÃO COLORIDO ORGÂNICO: DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS PARA O VESTUÁRIO POR MEIO DO CRUZAMENTO DE FIBRAS

Data de aceite: 19/06/2020
Data da submissão: 03/04/2020

Giulia Mendonça Tenorio de Alburquerque

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/1270487271303711>

Ronaldo Salvador Vasques

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/7159248225674871>

Fabício de Souza Fortunato

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/6707435689950700>

Camila Pereira

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/8178419931227268>

RESUMO: Embora os estudos tenham mostrado resultados propícios na utilização das fibras naturais, verifica-se que ainda há muito que ser averiguado e desenvolvido nesse tema específico. O artigo intitulado “Urtiga e algodão colorido orgânico: Desenvolvimento de produtos para o vestuário por meio do cruzamento de fibras com cunho sustentável” visa descobrir

novos materiais fibrosos. Desse modo, será utilizada a fibra da urtiga, que pode ser considerada de cunho sustentável devido ao seu modo de produção, solo específico e o não uso de qualquer substância química para o seu crescimento e cabe ainda dizer que é uma planta desperdiçada pela indústria por ser considerada uma praga nas plantações. A outra fibra que será utilizada é o algodão colorido orgânico, que também segue a mesma linhagem de sustentabilidade, não só na produção, mas também com o produto final, que dispensa um dos beneficiamentos têxteis mais poluentes, o tingimento. Neste contexto, este artigo tem como objetivo desenvolver produtos sustentáveis para o vestuário, mas que não deixa outras necessidades de mercado de lado, como, um design apropriado e atual e um custo benefício considerável, podendo significar uma atitude respeitável para o mundo da moda e principalmente servir como incentivo para outras organizações do ramo. O estudo será realizado a partir de dados e informações encontradas em livros, artigos e vídeos de manuseio das fibras utilizadas, identificando o tipo de plantio e manuseio. E por fim, no cruzamento das fibras identificar a melhor forma de fazer a trama e urdume (tecimento), desse modo, desenvolver produtos coerentes com as fibras, podendo

demonstrar a partir do resultado final que é viável conciliar moda, sustentabilidade e design. Este artigo é derivado do projeto de iniciação científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Universidade Estadual de Maringá (UEM), do curso de moda.

PALAVRAS-CHAVE: Têxteis; vestuário; sustentabilidade; moda.

STUDY OF FIBER OF NETTLE AND ORGANIC COLORED COTTON: DEVELOPMENT OF PRODUCTS FOR CLOTHING THROUGH FIBER CROSSING

ABSTRACT: Although studies have shown favorable results in the use of natural fibers, it appears that there is still much to be investigated and developed on this specific topic. The article entitled “Nettle and organic colored cotton: Development of products for clothing through the crossing of fibers with sustainable imprint” aims to discover new fibrous materials. In this way, the nettle fiber will be used, which can be considered sustainable due to its production method, specific soil and the non-use of any chemical substance for its growth and it is worth mentioning that it is a plant wasted by the industry for be considered a pest on plantations. The other fiber that will be used is organic colored cotton, which also follows the same lineage of sustainability, not only in production, but also with the final product, which dispenses with one of the most polluting textile benefits, dyeing. In this context, this article aims to develop sustainable products for clothing, but that does not leave other market needs aside, such as an appropriate and current design and a considerable cost benefit, which may mean a respectable attitude to the world of fashion and mainly serve as an incentive for other organizations in the industry. The study will be carried out based on data and information found in books, articles and videos for handling the fibers used, identifying the type of planting and handling. And finally, at the crossing of the fibers, identify the best way to make the weft and warp (weaving), in this way, develop products coherent with the fibers, being able to demonstrate from the final result that it is feasible to reconcile fashion, sustainability and design. This article is derived from the scientific initiation project (PIBIC) of the National Council for Scientific and Technological Development (CNPQ) and the Estate University of Maringá (UEM), of the fashion course.

KEYWORDS: Textiles; clothing; sustainability; fashion.

1 | FIBRAS DE CUNHO SUSTENTÁVEL: ALGODÃO COLORIDO ORGÂNICO X URTIGA

O Brasil não pode ser considerado um país de referência quando o assunto é sustentabilidade. As conceituadas universidades de Yale e Columbia dos Estados Unidos anualmente apontam quais os países mais sustentáveis do mundo através de um *ranking*, em 2018 o Brasil se encontrou na sexagésima nona posição em relação a cento e oitenta países ranqueados. A moda e os têxteis são uma das principais responsáveis pela insustentabilidade do sistema, não só no Brasil como em todo o mundo, práticas de beneficiamentos como a lavanderia, tingimento, os tipos de fibras utilizadas e o modo como são produzidas colaboram para que jornais como o BBC indiquem a indústria têxtil como a segunda mais poluente do sistema, perdendo apenas para a indústria do petróleo. A escassez de pesquisas no campo

também pode ser indicada como um fator que favorece com a não progressão do Brasil nessa área, diante disso, esse artigo visa redescobrir a fibra da urtiga, que era muito utilizada há séculos atrás, como por exemplo, século XX nas duas grandes Guerras Mundiais, e foi praticamente esquecida pela indústria têxtil, e misturá-la com uma especialidade brasileira produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (EMBRAPA), o algodão colorido orgânico, visando criar ao final um produto que seja sustentável, com a inserção do design, que seja economicamente viável e atenda às necessidades do mercado para possivelmente substituir fibras naturais utilizadas atualmente que não atendam a essas especificidades de mercado para possivelmente substituir fibras naturais utilizadas atualmente que não atendam a essas especificidades. Cabe dizer também que “O produto têxtil é uma das mais antigas manufaturas do homem, pois desde sempre, o homem entrelaçava as folhas de palmeiras, curtia e costurava as peles para usar no seu corpo. Com o tempo e a transformação da matéria-prima, ele aprendeu a manusear a fibra e transformá-la em fios, tecidos, malhas e, por último, a fazer o acabamento” (VASQUES, 2018). De acordo com Pezzolo (2007) foram encontrados no Paquistão e Peru há mais de 4500 anos espécies de algodão colorido, diretamente da natureza, porém essas espécies obtinham uma fibra muito curta e fraca e não suportariam a fabricação de um tecido, por exemplo. Impulsionados por uma demanda crescente de produtos com cunho sustentável a EMBRAPA resolveu trabalhar em um melhoramento genético do algodão colorido, realizado a partir do conceito de que o algodão tem órgãos, masculinos e femininos. Um dia antes das flores se abrirem são retirados todos os órgãos masculinos da algodoeira, colhe-se o órgão masculino de outra planta e a cruzam com o órgão feminino do algodão, aperfeiçoando seu comprimento e resistência (PEZZOLO, 2007). Além disso, a empresa também investiu no cultivo do algodão colorido com a agroecologia como ponto de partida, na região do Nordeste brasileiro, o agricultor utiliza os recursos que obtém ao seu redor, não sendo permitido o uso de produtos industrializados como adubos, inseticidas, herbicidas, fungicidas e outros capazes de poluir o solo, meio ambiente e a água (SANTOS E ROSSETO, 2017). Diante disso, cinco cultivares (cores) são produzidas, sendo elas a BRS 200 Marrom, BRS Verde, BRS Rubi, BRS Safira e a BRS Topázio, que segundo Fletcher (2011) impactam positivamente em diversos aspectos da sustentabilidade, como nos efeitos adversos sobre a água e seus ciclos, na poluição química, perda biodiversidade, no uso excessivo de recursos não renováveis, na geração de resíduos, efeitos negativos para a saúde humana e nos efeitos sociais prejudiciais para as comunidades produtora (Figura 1).



Figura 01 – Algodão colorido orgânico

Fonte : acervo da tecidoteca (Campus Regional de Cianorte - curso de MODA)

Desse modo, o cruzamento dessas fibras podem ser uma alternativa sustentável para esse momento do planeta, onde a escassez de recursos materiais estão diminuindo. Os autores Hartl e Volg (2002) juntamente com o Instituto de Agricultura Orgânica Ciências Agrárias (AOCA) em Viena acreditam que a fibra da urtiga foi utilizada como um substituto do algodão nas duas grandes Guerras Mundiais uma vez que o mesmo era restrito na época, os autores ainda afirmam Uma vez que o mesmo era restrito na época, os autores ainda afirmam que mesmo que a planta seja apontada pela agricultura tradicional como uma planta daninha a ser eliminada, a urtiga é considerada uma cultura promissora para a produção de fibra orgânica, devido à grande viabilidade de cultivá-la sob essas condições. Em suas publicações a Camira Fabrics cita que a urtiga corresponde a uma cultura perene que possui crescimento acelerado a partir da primavera, ampliam-se facilmente sem a necessidade de produtos industrializados como herbicidas e pesticidas e em terras que muitas vezes não se adequariam a outras culturas, tais como várzeas ou áreas abandonadas. Ainda indica que podem ser colhidos ao final do verão e deixados no campo para secar, até que suas folhas se decomponham sozinhas e ainda forneçam nutrientes ao solo para o próximo plantio. Para a produção da fibra, as hastes são levadas para decorticação, ou seja, separar as fibras que se localizam na parte externa do caule, da parte lenhosa, a fibra é encontrada disposta em feixes juntamente com as pectinas, logo após, são penteadas para que fiquem limpas e possam ser fiadas com ou sem misturas, tendo características como a resistência, elasticidade e com um comprimento desejável para a fiação com um comprimento desejável para a fiação (CAMIRA FABRICS,...). Embora com alto potencial de mercado, os produtos feitos de urtiga são atualmente mais um resultado de pesquisa e curiosidade do que de produção industrial em grande escala. No Brasil, de acordo com Paradella (2008) a fibra já foi produzida por índios Kaingang e Xokleng, no sul do país, especialmente Paraná e Santa

Catarina, e inclusive existem exemplares da mesma no acervo do Museu Paranaense (figura 2).



Figura 02 – Índia Xokleng tece manta com fibras de urtiga brava. 1950.

Fonte : Acervo Museu Paranaense (Curitiba-Pr).

Cabe dizer que a urtiga é considerada uma cultura promissora para a produção de fibra orgânica, devido à grande viabilidade de cultivá-la sob divergentes condições agrárias, o crescimento desta torna-se acelerado a partir da primavera e ampliam-se facilmente sem a necessidade de produtos industrializados como herbicidas e pesticidas. As plantas se adequam a áreas difíceis como várzeas ou territórios abandonados. Para a produção da fibra, as hastes são levadas para decorticação, isto é, separar as fibras que se localizam na parte externa do caule, da parte lenhosa. A fibra é encontrada disposta em feixes juntamente com as pectinas, após este processo, são penteadas para que fiquem limpas e possam ser fiadas com, ou, sem misturas de outras fibras. Possui características como a resistência, elasticidade e um comprimento desejável para a fiação.

A figura 03 mostra a planta de urtiga dioica ainda virgem.



Figura 03 – *Urtica dioica* L.

Fonte : Medicinal herbes

A mistura dessas duas grandes fibras pretende colaborar com a indústria têxtil e a moda brasileira criando uma fibra totalmente inovadora, que seja sustentável, resistente, com um comprimento desejável, confortável e naturalmente colorida. A sustentabilidade na atualidade não é só mais uma estratégia de marketing e muito menos apenas sinônimo de *status* de uma marca, é uma necessidade emergente no Brasil e no mundo inteiro, as características pertencentes às duas fibras, como o não uso de industrializados para a produção, a dispensabilidade do tingimento, o uso regrado de recursos naturais finitos como a água e o solo e a pouca geração de resíduos pode significar uma porcentagem relevante de benefícios tanto para o meio ambiental como social. Diante disso, a iniciativa de criar um produto que tem sustentabilidade como principal objetivo, mas que não deixa outras necessidades de mercado de lado como, um design apropriado e atual e um custo beneficiam consideráveis, pode significar uma atitude respeitável para o mundo da moda e principalmente servir como incentivo para outras organizações do ramo. Apesar da crescente utilização das fibras naturais em diversos setores, nota-se ainda ser necessário um grande avanço no âmbito das investigações para o desenvolvimento de novos materiais e aplicações, principalmente que garantam propriedades satisfatórias, muitas vezes únicas, quando comparadas aos seus análogos produzidos a partir de fibras derivadas do petróleo (SCHUCH; OLIVEIRA; STEFFENS, 2019, p. 6).

2 | METODOLOGIA APLICADA

O conjunto de ações metodológicas pra esse artigo na parte teórica foi feito uma varredura vertical e horizontal, bem como à compilação de artigos científicos e bibliográficos em periódicos conceituados sobre o algodão colorido orgânico e da fibra de urtiga. Na parte prática utilizou -se técnicas de fiação para duas fibras, foi investigado, analisado e

identificado a melhor forma de tecer. Desta maneira com a fibra pronta cruzada, iniciaremos o desenvolvimento do produto, pesquisa, esboço, croqui e a construção protótipo de vestuário.

3 | RECONHECIMENTO E AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e também à pesquisa de iniciação científica (PIBIC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) – Campus Regional de Cianorte (CRC), do departamento de Design e Moda (DDM) do curso de Moda pelo incentivo à pesquisa.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro do que foi explanado, percebemos que o cruzamento de fibras de urtiga com algodão colorido orgânico não há no mercado da moda um produto desenvolvido para o vestuário. Percebemos também que há poucos produtos neste segmento com preceitos de cunho sustentável e com design. O presente artigo justifica-se pela possibilidade de realização do experimento na universidade e para criar uma cultura regional. Com o desenvolvimento deste tipo de cruzamentos de fibras, aliado a sustentabilidade e design cria-se uma solução que possibilita materiais exclusivos, decorrentes da aparência das próprias fibras, além de proporcionarem um apelo sustentável, considerando chegar aos centros de estudos, principalmente os têxteis. E também incentivar e criar uma capacitação regional com esse tipo de tecer.

Para futuras pesquisas este estudo propõe no setor da moda/vestuário criar uma fibra inovadora cuja base funda-se a partir da miscigenação da fibra da urtiga com o algodão colorido orgânico brasileiro, visando agregar à indústria têxtil diversos benefícios relacionados a sustentabilidade e as características próprias de cada fibra, como resistência, comprimento, elasticidade e entre outras. Alinhando um produto de moda, que tenha design, atende as necessidades do comércio e contenha um bom custo benefício. Especificamente, analisar e estudar o comportamento das duas fibras, verificar qual a melhor técnica para tecer essa nova fibra e novo tecido, e ponderar um produto para a moda brasileira que realmente seja comerciável.

REFERÊNCIAS

FABRICS CAMIRA. Second Nature: Sustainability is Second Nature. **Camira Fabrics**. Mirfield. Disponível em: < https://cms.esi.info/Media/documents/Camira_sting_ML.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2019.

FLETCHER, Kate. **Moda & Sustentabilidade**: design para mudança. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2011.

HARTL, Anna; VOLG, R. Christian. Dry matter and fiber yields, and the fiber characteristics of white nettle clones (*Urtica dioica* L.) organically grown in Austria for potential textile use. **Organic e Prints**. Viena, 2002. Disponível em: < http://orgprints.org/6863/1/AJAA17_4_2002_nettle.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2019.

MEDICINAL HERBES <http://www.herbalpharmacy.eu/en/medicinal-herbs/44-stinging-nettle-leaves-50g->

8594015480756stinging-nettle-urtica. Acesso em: 10 dez. 2019.

NEWS BBC. Qual é a indústria que mais polui o meio ambiente depois do setor do petróleo ?. **BBC NEWS**. Brasil, 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-39253994>>. Acesso em: 04 fev. 2019.

PARALLADA, Inês Cláudia. Estética Indígena Jê no Paraná: tradição e mudança no acervo do museu paranaense. **Revista Científica FAP**. Curitiba, 2008. Disponível em: <<file:///C:/Users/Cliente/Downloads/1635-4217-1-SM.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

PARALLADA, Inês Cláudia; CREMONEZE, Cristina; BATISTELLI, Edígio; SARAIVA, Paredes Maurício; BASSFELD, Cássia de Marlise; Membros das etnias Kaingang. Guarani, Xetá e Xokleng. Vida Indígena no Paraná: memória, presença, horizontes. **PROVOPAR Ação Social**. Curitiba, 2006. Disponível em: <file:///C:/Users/Cliente/Downloads/Vida_indigena_no_Parana_memoria_presenca.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

PEZZOLO, Dinah Bueno. **Tecidos: história, tramas, tipos e usos**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2007.

SANTOS, Edna. Algodão Colorido é uma das tecnologias da Tecnofam em Mato Grosso do Sul. **Embrapa**. Brasília, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/12475936/algodao-colorido-e-uma-das-tecnologias-da-tecnofam-em-mato-grosso-do-sul>>. Acesso em: 06 fev. 2019

SANTOS, T.A.J., ROSSETTO, S.D.J. Algodão Orgânico Colorido: Gerando renda e cidadania na agricultura familiar do semiárido brasileiro. **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6958o.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2019.

SCHUCH, Amanda; OLIVEIRA, Ribeiro Fernando; STEFFENS, Fernanda. Fibras naturais de origem vegetal: uma revisão sobre novos desenvolvimentos e potenciais aplicações. **Química têxtil**. XLIII Janeiro, 2019 N° 133.

VASQUES, Ronaldo Salvador. **A indústria têxtil e a moda brasileira nos anos de 1960**. Editora: Apris, Curitiba, 2018.

YALE UNIVERSIT. 2018 EPI Results. **Environmental Performance Index**. New Haven, 2019. Disponível em: <<https://epi.envirocenter.yale.edu/epi-topline>>. Acesso em: 04 fev. 2019.

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ACESSÓRIOS VOLTADOS PARA O VESTUÁRIO UTILIZANDO COMO MATÉRIA-PRIMA O COURO DE KOMBUCHA

Data de aceite: 19/06/2020
Data da submissão: 13/04/2020

Caroline Schuch Klein

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte – PR

<http://lattes.cnpq.br/7828978059042975>

Ana Beatriz Pires da Silva

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte – PR

<http://lattes.cnpq.br/1261090782304485>

Ronaldo Salvador Vasques

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/7159248225674871>

Luciane do Prado Carneiro

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/4313449680807414>

Fabício de Souza Fortunato

Universidade Estadual de Maringá
Cianorte - PR

<http://lattes.cnpq.br/6707435689950700>

RESUMO: Com a crescente produção e consumo de peças de moda, os danos ao meio ambiente aumentaram e questões como a sustentabilidade vêm sendo

amplamente discutidas, fazendo com que os profissionais da área se preocupem em encontrar alternativas capazes de diminuir os prejuízos ao meio ambiente e às pessoas inseridas nele, permitindo um desenvolvimento econômico e social mais voltado ao cunho sustentável. A produção de couro de origem animal é altamente poluente, utilizando reagentes químicos como o cromo no processo de curtimento. Ao despejar os resíduos da produção, a qualidade de vida das pessoas é comprometida, assim como o solo e as águas. Na produção de couro sintético, o material mais comumente utilizado é o poliuretano, um polímero derivado do petróleo. Assim como as embalagens plásticas, este material leva anos até sua completa decomposição, causando danos ao meio ambiente. Este artigo tem por objetivo apresentar uma produção de acessórios (cintos, brincos, colares, carteiras, entre outros) para o vestuário utilizando como matéria prima a celulose de kombucha, derivado de um material obtido a partir da fermentação de chá verde ou preto, trazendo a possibilidade de produzir itens de moda com textura e aparência semelhante ao couro de forma sustentável e biodegradável, mais vantajosa para o meio ambiente do que as outras opções de couro existentes no mercado atual. Cabe dizer que

este estudo deriva de um projeto de iniciação científica da Universidade Estadual de Maringá (UEM) – Campus Regional de Cianorte (CRC) do curso de Moda, propõe a partir de dados e informações encontradas em livros, artigos e vídeos. E por fim serão realizados testes com a fermentação de chá preto ou verde juntamente de grandes quantias de açúcar e de uma associação simbiótica de bactérias que formam uma espécie de fungo à superfície, conhecido como SCOOPY e pesquisaremos também um selante.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; têxteis; moda; Kombucha.

STUDY AND DEVELOPMENT OF ACCESSORIES FOR THE CLOTHING USING KOMBUCHA LEATHER AS RAW MATERIAL

ABSTRACT: With an increase in the production and consumption of fashion items, the damage to the environment increased and issues such as sustainability are discussed, making professionals in the area concerned with finding possible alternatives to suffer damage to the environment and people involved it, allowing economic and social development more focused on the sustainable nature. The production of animal leather is highly polluting, using chemical reagents such as chromium in the tanning process. When dumping production residues, people's quality of life is compromised, as well as soil and water. In the production of synthetic leather, the most commonly used material is polyurethane, a polymer derived from petroleum. Like plastic packaging, this material takes years to completely decompose, causing damage to the environment. This article aims to present a production of accessories (belts, earrings, necklaces, wallets, among others) for the use of primary materials such as kombucha cellulose, derived from a material produced from the fermentation of green or black tea, bringing the possibility to produce fashion items with texture and appear in leather in a sustainable and biodegradable way, more advantageous for the environment than the other leather options in the current market. It is worth mentioning that this study derives from a scientific initiation project of the State University of Maringá (UEM) - Regional Campus of Cianorte (CRC) for the fashion course, it is applied based on data and information displayed in books, articles and videos. Finally, they will be tested with fermentation of black or green tea, with large amounts of sugar and a symbolic association of bacteria that form a species of fungus on the surface, known as SCOOPY and also using a more suitable.

KEYWORDS: Sustainability; textiles; fashion; Kombucha.

1 | MODA E OS CONCEITOS DE SUSTENTABILIDADE

Partindo do princípio de que a moda funciona como um espelho para os acontecimentos e preocupações da sociedade, é natural que a mesma seria eventualmente impactada pelo conceito de sustentabilidade. Para se adequar ao pensamento da sociedade, a moda deve adotar práticas sustentáveis, a fim de atender a demanda do mercado consumidor (DIAS e DANIEL, 2018). E também que os têxteis desde sempre são considerados “uma das mais antigas manufaturas do homem, pois desde sempre, o homem entrelaçava as folhas de palmeiras, curtia e costurava as peles para usar no seu corpo com o tempo e a transformação da matéria-prima, ele aprendeu a manusear a fibra e transformá-la em fios,

tecidos, malhas e, por último, a fazer o acabamento” (VASQUES, 2018). E como a moda e os têxteis podem ter preceitos de cunho sustentável? Para Gwilt (2011), a sustentabilidade está apoiada no tripé social, econômico e ecológico. Um produto não pode ser considerado sustentável se não houver equilíbrio entre esses três elementos, gerando assim um crescimento econômico sustentável.

O processo de produção do couro, por exemplo, é extremamente poluente e gera uma enorme quantidade de resíduos tóxicos em seu processo de fabricação, entre eles o sulfato de cromo, elemento químico utilizado na fase do curtimento. Os riscos de contaminação estão presentes em todas as etapas da produção, sendo perigoso para as pessoas que trabalham em sua fabricação (SOUZA, et al, 2010). Os resíduos tóxicos liberados ao longo da cadeia produtiva do couro, além de promover a destruição do ecossistema, e a degradação das terras, também causam danos à saúde humana, tais como: rinite e sinusite crônica, atrofia da mucosa nasal, alterações na pele, danos ao estômago, fígado e rins, choque cardiovascular e câncer (BRITO, 2013).

Sendo o mercado de moda um dos maiores e mais rentáveis do mundo, seus produtos são questionados quanto à origem, materiais, condições em que foi produzido e danos causados ao meio ambiente. Deste modo, o uso de materiais e práticas que reduzam o impacto ambiental é o melhor dos caminhos a serem tomados para o crescimento da economia, de forma sustentável e responsável. (FERNANDES e CASTILLO, 2018).

Uma das alternativas desenvolvidas para a confecção de produtos sustentáveis é a biomimética. Janine Bentyus, fundadora do BiomimicryInstitute e pioneira neste tipo de tecnologia divide a biomimética em três categorias: a natureza como modelo, como medida e como mentora. Segundo ela, ao observar processos industriais como ecossistemas poderíamos desenvolver novos produtos utilizando o descarte da matéria prima de outro produto (ABREU, 2016). Assim surge o termo biodesign, indicando projetos que utilizam organismos vivos como matéria prima do processo produtivo, fazendo uma analogia às soluções da natureza e as empregando no dia-a-dia. (ABREU apud MYERS, 2016)

A indústria têxtil é a responsável pelo desenvolvimento de grande parte dos projetos de design de moda envolvendo biomimética, simulando processos naturais e os empregando na construção de tecidos especiais (ABREU, 2016).

Um dos materiais que pode ser obtido através de biomimética é o couro de kombucha. O kombucha é uma bebida originária da China produzida pela fermentação de chá preto ou verde juntamente de grandes quantias de açúcar e através de uma associação simbiótica de bactérias e fermentos que formam uma espécie de fungo à superfície, conhecido como SCOBY, que pode ser visto na figura 1 (CACHO, 2013).



Figura 1 – Biotêxtil de kombucha sendo esticado para secar

Fonte: ABC News, 2016

Um dos mais importantes projetos de biodesign, o BioCuture foi criado por Suzanee Lee em Londres, 2011. Nele, Lee investiga microrganismos que originam biomaterial. Para isto, utiliza uma colônia simbiótica popularmente conhecida como kombucha, utilizada para fermentar uma bebida à base de chá verde ou preto. A cultura é adicionada ao chá juntamente de uma grande quantidade de açúcar em um recipiente plástico ou de vidro, onde permanece de duas a quatro semanas. A colônia atinge até dois centímetros de espessura e ocupa toda a superfície do recipiente, quando então é retirada, lavada, hidratada e seca.

2 | CONFECÇÃO DE ROUPAS E ACESSÓRIOS COM O KOMBUCHA

Após estes processos, o material têxtil criado pode ser utilizado para a confecção de roupas, sapatos e acessórios, como por exemplo, a jaqueta mostrada na figura 2, produzida com couro de kombucha e estampada com frutas (ABREU, 2017).



Figura 2 – Jaqueta estampada produzida por Suzanee Lee utilizando couro de kombucha

Fonte: Dezeen, 2014

O couro de kombucha não é um material impermeável, necessitando assim de selantes para ser resistente à água. A cera de abelha é uma alternativa biodegradável para tornar o material mais resistente, mas ainda não foi descoberto um método ou produto que o torne verdadeiramente impermeável. Caso descoberta uma alternativa, o couro de kombucha tem grande potencial para substituir o couro animal na confecção de peças de vestuário (PAYNE, et al, 2016). Desse modo, este projeto de iniciação científica da Universidade Estadual de Maringá – Campus Regional Cianorte, curso de moda irá fazer testes para solucionar uma forma de selantes que seja resistente à água e seja sustentável e por último ainda estudar uma alternativa biodegradável para tornar o material mais resistente.

3 | METODOLOGIA APLICADA AO ESTUDO DO KOMBUCHA

Para a realização deste estudo serão feitas pesquisas bibliográficas em livros, artigos e revistas científicas, como Periódico Capes, banco de dados de Teses e Dissertações e vídeos específicos da produção de couro de kombucha existentes. Em seguida, realizaremos os testes com amostras a fim de encontrar uma alternativa impermeabilizante, para a confecção de acessórios utilizando a matéria-prima produzida e por fim elaborar de material técnico contendo as especificidades do biotêxtil.

4 | RESULTADOS DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA MATERIA PRIMA ATÉ O MOMENTO

A matéria-prima utilizada na pesquisa começou a ser desenvolvida em março de 2019, a partir da doação de uma scoby mãe, como visto no lado esquerdo da figura 3. Em 21 dias houve a formação de uma nova scoby, e a cada troca de chá fermentado outra scoby surgia.



Figura 3 – Primeira fermentação

Fonte: Autoria própria

Quando a segunda scoby foi formada, a mesma passou pelo procedimento de secagem e hidratação (como pode ser visto na figura 4), que originou um material extremamente maleável e que retornava ao seu formato original. Durante a pesquisa foi possível perceber que em dias de chuva o material mudava sua textura, se tornando mais mole e úmido, reforçando a necessidade de um selante.



Figura 4 – Primeira scoby seca e hidratada

Fonte: Autoria própria

Neste momento da pesquisa estão sendo realizados testes como a resistência a costura, umidade, sol, calor, lavagem doméstica (máquina de lavar), produtos de limpeza e aceitação da matéria-prima em peles sensíveis e não sensíveis.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a questão da sustentabilidade em produtos de moda estar neste momento em ascensão, esta matéria prima irá gerar produtos com preceitos sustentáveis. Dentro do que foi explanado, percebemos que o Kombucha é pouco explorado no desenvolvimento de acessórios para o vestuário. Percebemos também que não há um selante com preceitos de cunho sustentável e com resistência. Este estudo propõe encontrar meios de desenvolver um produto e experimento na universidade e para centros de estudos têxteis e áreas afins, criar uma capacitação regional com uma elaboração de uma bandeira têxtil com informações específicas e procedimentos para fazer esse produto, ou seja a confecção de acessórios para o vestuário utilizando o couro de kombucha. E desse modo, utilizar os dados técnicos para pesquisa e uso na indústria da confecção e de têxteis. Como perspectiva futura criar um produto com conceitos de sustentabilidade que possa ser mais uma alternativa para o futuro da moda.

6 | RECONHECIMENTO E AGRADECIMENTOS

Agradecimento a pesquisa de iniciação científica (PIC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) – Campus Regional de Cianorte (CRC), do departamento de Design e Moda (DDM) do curso de Moda pelo incentivo à pesquisa e a extensão.

REFERÊNCIAS

- ABREU, B. T. R. **BioStudio**: tingimento e estamparia de tecidos orgânicos utilizando bactérias. *Dobras*. v.9, nº 19, p. 88 – 110, 2016.
- ABREU, B., NÓBREGA, C. (2017). **BioStudio: seres vivos, tecidos e inovação**. *Mix Sustentável*. 87 – 99.
- BRITO, Georgya Almeida. **Impactos ambientais gerados pelos curtumes**. In: *Colóquio de Moda*, 9, 2013, Fortaleza.
- CACHO, Filipa Vieira. **Desenvolvimento de um têxtil**: Malha artesanal e sustentabilidade. 2011. Faculdade de Arquitectura – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- DIAS, Camila; DANIEL, Marli. **Consumo e o impacto socioambiental**. In: *Colóquio de Moda*, 14, 2018.
- FERNANDES, Laura; CASTILLO, Leonardo. **Moda e sustentabilidade**: uma perspectiva da moda sustentável no discurso jornalístico. In: *Colóquio de Moda*, 14, 2018.
- GWILT, Alisson; RISSANEN, Timo. **Shaping Sustainable Fashion**: Changing the way we make and use clothes. 1ª ed. London: Earthscan, 2011.
- PAYNE, Alice; BROUGH, Dean; MUSK, Peter. **Will we soon be growing our own vegan leather at home?**. *The Conversation*. 2016.
- SOUZA, EG., et al. **Impactos ambientais no setor coureiro-calçadista em Campina Grande – PB**: uma análise quanto à utilização do cromo no processo produtivo. In: LIRA, WS., and CÂNDIDO, GA., orgs. *Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa* [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2013.
- VASQUES, Ronaldo Salvador. **A indústria têxtil e a moda brasileira nos anos de 1960**. Editora: Apris, Curitiba, 2018.

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICADO AO PRÉ-TRATAMENTO DA BATATA DOCE COM ÁCIDO CÍTRICO E À SECAGEM PARA AVALIAÇÃO DA COR

Data de aceite: 19/06/2020

Tamires Barlati Vieira da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos
Campo Mourão – Paraná

Ana Paula da Silva Sbrunhera

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Alimentos (DALIM)
Campo Mourão – Paraná

Priscila Dayane de Freitas Santos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos
Campo Mourão – Paraná

Thaysa Fernandes Moya Moreira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos
Campo Mourão – Paraná

Anielle de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos
Campo Mourão – Paraná

Fernanda Vitória Leimann

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos

Campo Mourão – Paraná

Bogdan Demczuk Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Alimentos (DALIM)
Campo Mourão – Paraná

RESUMO: A batata doce se destaca dos demais carboidratos justamente por seu baixo índice glicêmico, apresentando inúmeras aplicações tanto no âmbito doméstico, quanto na indústria. O objetivo do presente trabalho foi de estudar as variações nos parâmetros de cor da batata doce após passar pelo processo de secagem em diferentes temperaturas (50°C, 60°C e 70°C) e com diferentes concentrações de ácido cítrico (0,2%, 0,6%, 1,0%), sendo utilizado um planejamento experimental. Foram avaliados os parâmetros instrumentais de cor (L^* , a^* e b^*) sendo possível somente obter um modelo preditivo para a resposta de luminosidade após a secagem. Com a superfície de resposta, foi possível identificar que em temperaturas mais baixas e menor concentração de ácido cítrico houve preservação da luminosidade, sendo menor o efeito de escurecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Batata doce; secagem; ácido cítrico; temperatura; cor.

EXPERIMENTAL PLANNING APPLIED TO PRE-TREATING SWEET POTATOES WITH CITRIC ACID AND DRYING FOR COLOR ASSESSMENT

ABSTRACT: The sweet potato stands out for its low glycemic index and it has been increasing in number of applications both domestically and in the industry. The objective of the present work was to study the variations in the color parameters of sweet potato after drying in different temperatures (50°C, 60°C and 70°C) and with different concentrations of citric acid (0.2%, 0.6%, 1.0%), and an experimental design was used. The instrumental color parameters (L^* , a^* and b^*) were evaluated and it was possible to obtain a predictive model for the luminosity response (L^*) after drying. With the contour surface of the response, it was possible to identify that the combination of lower temperatures and lower concentration of citric acid resulted in a preservation of luminosity, or a lower darkening effect.

KEYWORDS: Sweet potato; drying; Citric acid; temperature; color.

1 | INTRODUÇÃO

O processo de secagem por convecção de ar é largamente utilizado para a secagem de frutas e vegetais, porém, alguns estudos apontam uma série de problemas associados a esse processo por convecção, como alteração físicas de cor, textura e alterações químicas (QUEIROZ et al., 2007). A qualidade do produto seco está diretamente ligada a temperatura utilizada no processo, sendo que altas temperaturas estão associadas a perda de qualidade e em contrapartida, baixas temperaturas associadas ao tempo de secagem, tornam o processo inviável (ARGYROPOULOS; KHAN; MÜLLER, 2011).

O ácido cítrico é amplamente utilizado na indústria de alimentos para a inibição do escurecimento em frutas enlatadas e outros produtos (LIU et al., 2013). No entanto, informações limitadas estão disponíveis sobre o impacto da acidificação com ácido cítrico na secagem de batatas doce.

A batata-doce (*Ipomoea batatas* L.), pertencente da família das convolvulaceas, é uma hortaliça tuberosa, originária da América do Sul (SOUZA; RESENDE, 2001). Segundo o IBGE, no ano de 2010 a produção no Brasil, da região sudeste, sul e centro-oeste somadas chegou a 307.169 toneladas, destacando-se a região sul com aproximadamente 86,5% do valor total (IBGE, 2010). É um alimento altamente reconhecido pelo seu baixo índice glicêmico (BJÖRCK; LILJEBERG; OSTMAN, 2000).

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi a aplicação de ácido cítrico como pré-tratamento para a avaliação da cor após a secagem de batata doce em diferentes temperaturas com o uso de um planejamento experimental.

2 | MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Material

As batatas doces, o hipoclorito de sódio e o ácido cítrico foram adquiridas no comércio local de Campo Mourão, Paraná, Brasil.

2.2 Preparo das amostras

As batatas doces foram higienizadas com hipoclorito de sódio em uma solução de 2 ppm, descascadas manualmente e cortadas de maneira uniforme com utensílios domésticos, com dimensões de 1 cm de altura por 1 cm de espessura e 5 cm de comprimento. As amostras foram submetidas ao pré-tratamento com solução de ácido cítrico (0,2%, 0,6% e 1,0%). As amostras permaneceram imersas à temperatura ambiente por um período de 3 minutos e em seguida foram drenadas em papel absorvente.

2.3 Planejamento fatorial completo aplicado à secagem

Um planejamento de experimentos fatorial 3^2 com duas repetições no ponto central (11 experimentos) foi gerado pelo software Statistica 7.0 (StatSoft Incorporation, Tulsa, Oklahoma, EUA, 2006). As condições experimentais foram definidas conforme a temperatura de secagem da batata doce (X_1), bem como a concentração de ácido cítrico aplicado no pré-tratamento (X_2), conforme descrito nas Tabelas 1 e 2.

A secagem foi realizada em uma estufa com circulação de ar, onde as amostras foram alocadas em bandejas, que por sua vez, foram acondicionadas nas prateleiras da estufa. A leitura de massa em balança analítica foi realizada a cada 1 minuto, durante 10 minutos. Em seguida a cada 5 minutos, durante 50 minutos posteriormente, a cada 10 minutos, até que não houvesse variação significativa de massa.

A	-1	0	+1
T (°C) (X_1)	50	60	70
CA (%p/v) (X_2)	0,2	0,6	1,0

Tabela 1. Valores reais dos níveis utilizados no planejamento fatorial completo

Ensaio	X_1	X_2
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	+
6	+1	-1
7	+1	0
8	+1	+1
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Tabela 2. Planejamento fatorial completo (3^2) para a secagem de batata doce

As variáveis respostas avaliadas foram os parâmetros de cor depois da secagem (L^* , a^* e b^*) em relação as amostras pré-tratadas. Os parâmetros de cor das amostras foram

medidos após o processo de secagem utilizando um espectrofotômetro de reflectância difusa MiniScan EZ (HunterLab, MSEZ-4000S, USA). O instrumento com sensor ótico geométrico de esfera, utilizando ângulo de observação de 2°, iluminante principal D75 e escala CIELab. O eixo L* representa a luminosidade, de 0 (preto) a 100 (branco). O parâmetro a* expressa o eixo verde/vermelho (-a*/a*) e b*, o eixo azul/amarelo (-b*/b*). A variação de cor (ΔE^*) das amostras contendo extrato de pinhão, com relação ao controle foi calculada com a Equação (1).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Os dados experimentais foram ajustados de acordo com o modelo polinomial de segunda ordem e os coeficientes de regressão obtidos. O modelo generalizado de segunda ordem utilizado nas análises está descrito na Equação (2).

$$Y_n = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde X_1 e X_2 são variáveis independentes; Y_n a variável dependente e; b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} , b_{22} , b_{12} , são os coeficientes de regressão para termos de interceptação, linear, quadrático e interação, respectivamente.

Os modelos de resposta foram avaliados primeiro em relação à significância dos coeficientes do modelo pela aplicação da ANOVA com 5% de significância. Os termos que não mostraram significância em cada modelo foram eliminados e o coeficiente de determinação e o coeficiente de ajuste do modelo (R^2 e R^2_{ajustado}) foram avaliados para definição da composição final do modelo. Se os modelos determinados foram considerados significativos (regressão $p < 0,05$) e sem falta de ajuste ($p > 0,05$), as plotagens de contorno foram finalmente obtidas.

2.4 Modelagem da cinética de secagem

A variação do teor de umidade durante o processo de secagem das amostras de batata doce pré-tratadas, bem como das amostras de controle (sem pré-tratamento), foi representada pelos seguintes modelos matemáticos: Newton, Henderson-Pabis e Page (Equações 3, 4 e 5, respectivamente) (REIS, 2011).

$$MR = \exp(-d \cdot t) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$MR = a \cdot \exp(-b \cdot t) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$MR = \exp(-c \cdot t^n) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde “MR” é a taxa de umidade; “a”, “b”, “c”, “n” e “d” são constantes dos modelos e “t” é o tempo (min). O ajuste da curva e a análise de regressão foram realizados usando o MATLAB R2013b. Inc, MathWorks Natick, Massachusetts, EUA. O melhor ajuste foi escolhido de acordo com a soma mínima de quadrados devido a erro para o ajuste (SSE, Equação (6)), erro padrão mínimo do ajuste (RMSE, Equação (7)), coeficiente de determinação (R^2) e R^2_{ajustado} ($> 0,98$ é considerado aqui um ajuste razoável).

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_{ei} - y_{pi})^2 \quad \text{Eq. (6)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_{ei} - y_{pi})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde y_{ei} é a i-ésima resposta experimental; y_{pi} é a i-ésima resposta prevista e, N é o número de observações.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação do planejamento experimental de secagem

Ensaio	Y_1 (L')	Y_2 (a')	Y_3 (b')	Y_4 (ΔE)
1	71,42 ± 3,60	1,84 ± 0,26	14,03 ± 1,56	14,69
2	72,86 ± 2,74	1,63 ± 0,50	13,30 ± 1,23	11,52
3	70,68 ± 3,31	1,78 ± 0,53	13,97 ± 1,07	11,90
4	74,15 ± 3,34	1,71 ± 0,24	13,65 ± 2,00	14,26
5	67,64 ± 7,60	2,05 ± 0,37	13,36 ± 0,76	17,64
6	62,94 ± 9,09	1,96 ± 0,78	14,26 ± 2,43	16,30
7	61,73 ± 4,96	1,49 ± 0,61	12,76 ± 0,59	25,73
8	57,34 ± 2,16	1,23 ± 0,25	12,935 ± 0,66	28,44
9	66,47 ± 3,39	2,33 ± 0,09	16,122 ± 0,63	16,12
10	71,28 ± 0,96	1,15 ± 0,12	13,84 ± 1,10	14,45
11	71,32 ± 5,39	1,91 ± 0,48	12,36 ± 2,00	17,59

Tabela 3. Planejamento experimental aplicado à secagem de batata-doce: temperatura de secagem (concentração, X_1) e concentração de ácido cítrico (X_2) e as respostas obtidas: parâmetros de cores obtidos após a secagem (L^*_d , a^*_d e b^*_d), e diferenças de cor analisadas após secagem (ΔE_d) em relação à cor das amostras pré-tratadas com ácido cítrico.

Os resultados relacionados à avaliação da cor após secagem de batata doce são apresentados na Tabela 3. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da ANOVA obtidos para a análise dos modelos de respostas. Observa-se que as únicas respostas que apresentaram modelos significativos para descrever o comportamento da secagem de batata doce foram a luminosidade determinada após a secagem (L^*), a diferença de cor após a secagem (ΔE_d).

Os resultados dos coeficientes de correlação (R^2 e $R^2_{ajustado}$) indicam que os ajustes foram adequados, sendo a maior parte da variabilidade das respostas explicada pelos modelos. A adequação dos ajustes também foi confirmada com o teste de falta de ajuste ($p > 0,05$). Esses resultados são indicativos de que ambos os modelos podem ser usados para fins de previsão. Na Tabela 5 são apresentados os respectivos coeficientes de regressão.

Modelo		Soma dos quadrados	**GL	Quadrado médio	p-valor
L^*	Regressão	258,2872	5	51,6574	0,011321
	Erro	24,9203	5	4,9841	
$R^2 = 91,201$	Falta de ajuste	9,351	4	2,3378	0,859198
	Erro puro	15,569	2	7,7847	
$R^2_{ajust.} = 82,401$	Total SS	283,208	10		
*Std, Er, = 2,232					
ΔE_d	Regressão	269,3284	5	53,8657	0,003355
	Erro	15,1498	5	3,0300	
$R^2 = 94,674$	Falta de ajuste	10,198	4	2,5496	0,546859
	Erro puro	4,952	2	2,4758	
$R^2_{ajust.} = 89,349$	Total SS	284,478	10		
*Std, Er, = 1,741					

*Std. Er. - Erro padrão da capacidade de previsão de modelos; **GL - Graus de liberdade;

Tabela 4. ANOVA para os modelos que descrevem a luminosidade da batata doce após a secagem (L^*_d) e diferença de cor após a secagem (ΔE_d).

Coeficientes	L^*	p-valor	ΔE_d	p-valor
b_0	70,171	$31,601 \times 10^{-5}$	16,012	$1,926 \times 10^{-3}$
b_1	-5,494	0,040	5,396	0,014
b_1^2	-4,007	0,141	2,085	0,160
b_2	-2,140	0,201	2,121	0,081
b_2^2	-	-	-	-
$b_1.b_2$	-1,214	0,476	3,732	0,042

Tabela 5. Coeficientes de regressão dos modelos ajustados.

Os coeficientes de regressão para o modelo de luminosidade indicam que o único fator significativo ($p < 0,05$) que afeta a resposta foi o coeficiente linear de temperatura de secagem (b_1). Os demais coeficientes que apresentaram $p > 0,05$ não foram removidos da

composição do modelo para manter a capacidade preditiva do mesmo.

O efeito antagonista da temperatura de secagem na luminosidade pode ser observado na Figura 1, onde as superfícies de contorno são mostradas. Observa-se que, na faixa de temperatura de 50 a 60 °C, a luminosidade apresentou valores superiores a 70. É possível identificar uma região localizada entre 52 e 58 °C e abaixo de 0,28% de ácido cítrico que os maiores valores de luminosidade foram previstos (> 72).

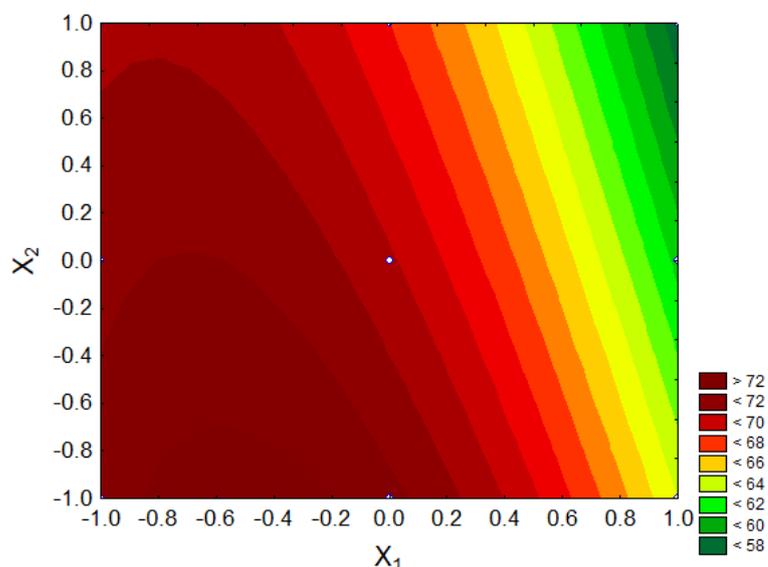


Figura 1. Superfícies de contorno de resposta de Luminosidade (Y_1, L^*).

A combinação de menor temperatura e menor concentração de ácido cítrico resultou em preservação da luminosidade ou em menor efeito de escurecimento. A redução da luminosidade durante a secagem dos alimentos está relacionada ao desenvolvimento do escurecimento, pela reação de Maillard, que envolve a reação de um aldeído (geralmente um açúcar redutor) e uma amina (geralmente uma proteína ou aminoácido) e é altamente dependente da temperatura (Chua et al., 2000; Rytel et al., 2017). O ácido cítrico atua como um agente de redução do pH do sistema, levando à redução da oxidação do escurecimento (Chaethong and Pongsawatmanit, 2015) e esse efeito foi mais evidenciado até 60 °C, após esta temperatura, uma diminuição significativa no parâmetro L^* foi detectada independentemente de a quantidade de ácido cítrico aplicada.

3.2 Cinética de secagem da batata doce

Na Figura 2 são apresentados os resultados da variação do teor de umidade (proporção de umidade) em amostras de batata doce em função da temperatura de secagem e da concentração de pré-tratamento com ácido cítrico.

Os resultados experimentais sugerem que o processo apresentou comportamento uniforme e contínuo para todas as amostras. A principal diferença verificada foi a menor taxa de secagem observada na amostra de batata doce submetida ao pré-tratamento com ácido cítrico, quando comparada às amostras sem pré-tratamento na mesma temperatura.

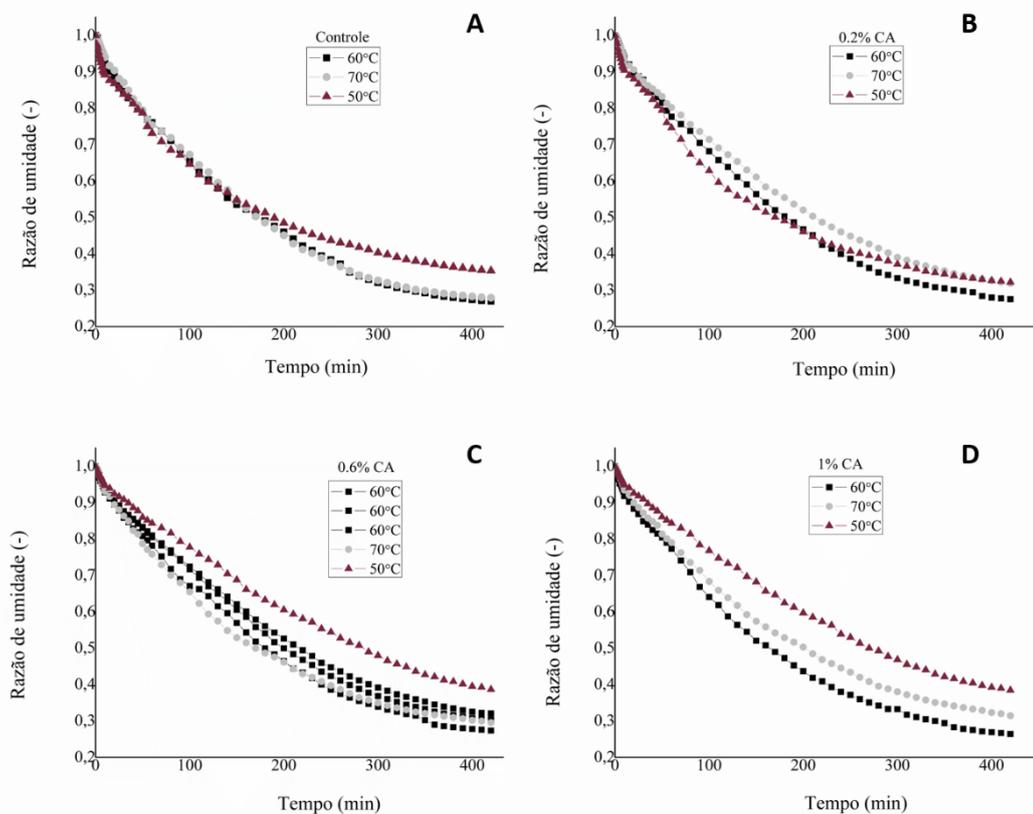


Figura 2. Variação do teor de umidade durante a secagem de batata doce em relação ao Controle (a); 0,2% CA (b); 0,6% CA (c) e, 1% CA (d).

Provavelmente, o ácido cítrico contribuiu para a formação de uma camada de amido reticulado na superfície da batata doce, comprometendo a transferência de massa de água através da superfície externa (Wilpiszewska and Czech, 2014). Quando o amido é reticulado com ácido cítrico, é esperada uma redução na permeação de vapor de água através da estrutura (González Seligra et al., 2016). Esse resultado implicou também em diferenças no tempo de secagem para alcançar o equilíbrio, bem como no teor final de umidade das amostras. Quando a temperatura foi fixada em 70 °C, o equilíbrio foi alcançado aos 420 minutos para a amostra pré-tratada com ácido cítrico e a 400 minutos para a amostra sem pré-tratamento. Para a relação final de umidade alcançada, pode-se observar um valor final igual a 0,325 para a amostra pré-tratada com ácido cítrico a 1% e 0,275 para a amostra controle (sem pré-tratamento).

Na Tabela 6 são mostrados os valores das constantes determinadas a partir dos modelos aplicados aos dados experimentais da cinética de secagem. Como as curvas de secagem tinham uma forma exponencial em todas as temperaturas de trabalho, recomenda-se o uso dos modelos empírico-exponenciais propostos por Newton, Henderson-Pabis e Page (Vega et al., 2007) 60, 70, 80 and 90 \u00b0C with an air flow of 2.0\u00b110.2 m/s. The sorption isotherm of the fresh product was mathematically described by the Guggenheim, Anderson

and de Boer (GAB. É possível observar que os dados experimentais obtidos apresentaram melhor ajuste pelo modelo de Page, uma vez que foram obtidos maiores coeficientes de determinação (R^2 e $R^2_{ajustado}$), menor soma mínima dos quadrados por erro de ajuste (SSE) e menor erro padrão mínimo do ajuste (RMSE). O modelo de Page é uma modificação empírica do modelo de Newton, em que os erros associados ao uso do modelo de Newton são bastante minimizados pela adição de uma constante empírica sem dimensão (n) (Onwude et al., 2016) também descobriram que o modelo de Page descrevia adequadamente a secagem por convecção de fatias de batata doce em um intervalo selecionado de temperaturas do ar de secagem (50 a 60 °C). O modelo de Page também foi determinado como o melhor modelo para descrever a secagem de sólidos alimentares de camada fina sob condições de secagem constantes, como uvas sem sementes (Doymaz & Pala, 2002) e fatias de maçã (Véga-Galvez et al., 2008). Véga-Galvez et al. (2008) descobriram que o modelo de Page apresentava o melhor ajuste para os dados experimentais obtidos na secagem de fatias de maçã entre 40 °C e 80 °C. (Lisboa et al., 2018) observaram um aumento no valor das constantes “b” de Henderson-Pabis e “c” nos modelos de Page, à medida que a temperatura de secagem dos cilindros de batata yacon aumentou. No presente estudo, esse comportamento não pode ser observado para todas as amostras de batata doce.

	50°C	Controle	0,2% CA	0,6% CA	1% CA
Newton	R ²	0,924	0,950	0,995	0,995
	R ² adj	0,924	0,950	0,995	0,995
	SSE	0,203	0,157	0,012	0,012
	RMSE	0,060	0,053	0,015	0,015
	d	0,003	0,003	0,002	0,002
Henderson-Pabis	R ²	0,969	0,975	0,998	0,998
	R ² adj	0,969	0,974	0,998	0,998
	SSE	0,082	0,080	0,004	0,004
	RMSE	0,039	0,038	0,008	0,009
	a	0,916	0,932	0,979	0,979
	b	0,003	0,003	0,002	0,002
Page	R ²	0,996	0,995	0,998	0,998
	R ² adj	0,996	0,995	0,998	0,998
	SSE	0,011	0,017	0,004	0,004
	RMSE	0,014	0,017	0,009	0,008
	c	0,022	0,017	0,004	0,004
	n	0,654	0,708	0,902	0,902
	60°C	Control	0,2% CA	0,6% CA	1% CA
Newton	R ²	0,783	0,775	0,993	0,985
	R ² adj	0,783	0,775	0,993	0,985
	SSE	0,842	0,894	0,024	0,057
	RMSE	0,123	0,126	0,020	0,032
	d	0,004	0,003	0,003	0,004

Henderson-Pabis	R ²	0,818	0,792	0,997	0,992
	R ² adj	0,815	0,788	0,997	0,991
	SSE	0,706	0,829	0,010	0,031
	RMSE	0,113	0,123	0,013	0,023
	a	0,910	0,939	0,972	0,960
	b	0,003	0,003	0,003	0,004
Page	R ²	0,804	0,783	0,998	0,997
	R ² adj	0,801	0,779	0,998	0,997
	SSE	0,761	0,863	0,007	0,011
	RMSE	0,118	0,125	0,011	0,014
	c	0,014	0,009	0,006	0,009
	n	0,755	0,826	0,879	0,826
	70°C	Control	0,2% CA	0,6% CA	1% CA
Newton	R ²	0,986	0,991	0,975	0,983
	R ² adj	0,986	0,991	0,975	0,983
	SSE	0,059	0,038	0,040	0,060
	RMSE	0,032	0,025	0,040	0,032
	d	0,004	0,004	0,004	0,003
Henderson-Pabis	R ²	0,990	0,993	0,983	0,990
	R ² adj	0,990	0,993	0,983	0,989
	SSE	0,059	0,027	0,063	0,036
	RMSE	0,027	0,021	0,033	0,025
	a	0,968	0,974	0,957	0,963
	b	0,003	0,003	0,003	0,003
Page	R ²	0,996	0,997	0,996	0,998
	R ² adj	0,996	0,997	0,996	0,998
	SSE	0,016	0,013	0,014	0,008
	RMSE	0,017	0,015	0,016	0,012
	c	0,040	0,061	0,014	0,009
	n	0,555	0,494	0,699	0,811

Tabela 6. Resultados dos parâmetros de modelagem de secagem obtidos com os modelos Newton, Henderson-Pabis e Page para batatas doce pré-tratadas com ácido cítrico e amostras de controle: secagem a 50, 60 e 70 °C.

4 | CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível verificar que o tratamento com ácido cítrico resultou em uma menor taxa de secagem nas batatas doce do que os demais tratamentos numa mesma temperatura. Já a temperatura de secagem apresentou influência sob alguns parâmetros e, indica-se a temperatura de 60 °C para este procedimento uma vez que a batata doce atinge o equilíbrio de secagem mais rapidamente. Dentre os modelos avaliados, é indicado para previsão do comportamento de secagem da batata doce o modelo de Page por apresentar melhor ajuste experimental, maiores coeficientes de determinação (R² e R²_{ajustado}), menor soma mínima dos quadrados por erro de ajuste (SSE) e menor erro padrão mínimo do ajuste (RMSE).

REFERÊNCIAS

- Argyropoulos, D.; Khan, M. T.; Müller, J. Effect of air temperature and pre-treatment on color changes and texture of dried boletus edulis Mushroom. *Drying Technology*, v. 29, n. 16, p. 1890–1900, 2011.
- Björck, I.; Liljeberg, H.; Ostman, E. Low glycaemic-index foods. *British Journal of Nutrition*, v. 83, p. 149–155, 2000.
- Chaethong, K., Pongsawatmanit, R., 2015. Influence of Sodium Metabisulfite and Citric Acid in Soaking Process after Blanching on Quality and Storage Stability of Dried Chili. *J. Food Process. Preserv.* 39, 2161–2170. doi:10.1111/jfpp.12460
- Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., 2000. Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Dry. Technol.* 18, 907–936.
- Doymaz, Ibrahim, 2010. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. *Food Bioprod. Process.* 88, 124–132.
- González Seligra, P., Eloy Moura, L., Famá, L., Druzian, J.I., Goyanes, S., 2016. Influence of incorporation of starch nanoparticles in PBAT/TPS composite films. *Polym. Int.* 65, 938–945. doi:10.1002/pi.5127
- IBGE. Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2011_v37_br.pdf>
- Khalloufi, S., Kharaghani, A., Almeida-Rivera, C., Nijse, J., van Dalen, G., Tsotsas, E., 2015. Monitoring of initial porosity and new pores formation during drying: A scientific debate and a technical challenge. *Trends Food Sci. Technol.* 45, 179–186. doi:10.1016/j.tifs.2015.06.011
- Lisboa, C.G.C. De, Gomes, J.P., Figueirêdo, R.M.F. De, Queiroz, A.J.D.M., Diógenes, A.D.M.G., Melo, J.C.S. De, 2018. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Effective diffusivity in yacon potato cylinders during drying 1 Difusividade efetiva em batata yacon 564–569.
- Liu, F.-X. et al. Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chemistry*, v. 138, n. 1, p. 396–405, 2013.
- Onwude, D.I., Hashim, N., Janius, R.B., Nawi, N.M., Abdan, K., 2016. Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 15, 599–618. doi:10.1111/1541-4337.12196
- Queiroz, V. A. V. et al. Desidratação por imersão-impregnação e secagem por convecção de goiaba. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n. 10, p. 1479–1486, 2007.
- Rytel, E., Tajner-Czopek, A., Miedzianka, J., Kita, A., Nemš, A., Hamouz, K., 2017. Acrylamide content in dried coloured-flesh potato products: Effects of drying. *Int. J. Food Prop.* 20, S228–S239. doi:10.1080/10942912.2017.1295255
- Singh, S., Raina, C.S., Bawa, A.S., Saxena, D.C., 2006. Effect of pretreatments on drying and rehydration kinetics and color of sweet potato slices. *Dry. Technol.* 24, 1487–1494. doi:10.1080/07373930600952834
- Souza, J. L.; Resende, P. L. Cultivo Orgânico de Alho, Cenoura, Baroa, Beterraba e Batata-Doce. Viçosa, MG: Centro de Produções Técnicas, 2001.
- Vega, A., Uribe, E., Lemus, R., Miranda, M., 2007. Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT - Food Sci. Technol.* 40, 1698–1707. doi:10.1016/j.lwt.2007.01.001
- Wilpiszewska, K., Czech, Z., 2014. Citric acid modified potato starch films containing microcrystalline cellulose

CARACTERIZAÇÃO DE MEL E HIDROMEL ATRAVÉS DE CROMATOGRAFIA LÍQUIDA DE ALTA EFICIÊNCIA

Data de aceite: 19/06/2020

Marcello Lima Bertuci

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Departamento de Engenharia e Tecnologia de
Alimentos, São José do Rio Preto – SP.
<http://lattes.cnpq.br/6309312276705214>

Lígia Boarin Alcalde

Universidade Federal da Grande Dourados
(UFGD), Faculdade de Engenharia, Dourados
– MS.
<http://lattes.cnpq.br/3183000540374121>

Silvia Maria Martelli

Universidade Federal da Grande Dourados
(UFGD), Faculdade de Engenharia, Dourados
– MS.
<http://lattes.cnpq.br/2368005158362357>

Évelin Marinho de Oliveira

Universidade Federal da Grande Dourados
(UFGD), Faculdade de
Engenharia, Dourados – MS.
<http://lattes.cnpq.br/5132312515165321>

Angela Dulce Cavenaghi Altemio

Universidade Federal da Grande Dourados
(UFGD), Faculdade de
Engenharia, Dourados – MS.
<http://lattes.cnpq.br/5623031966581265>

RESUMO: O mel é um produto alimentício de grande comercialização, produzido por

abelhas. Em algumas regiões, seu uso é empregado de forma majoritária como medicamento natural. O Hidromel é uma bebida alcoólica que resulta da fermentação do mel de abelha e pode ser classificado de diferentes modos conforme sua fabricação. Essa bebida tem papel secundário na atividade apícola, que tem como principal a produção do mel. Entretanto, sua importância econômica ainda é relevante, em consideração aos valores que este produto pode ter no mercado. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar por meio de análise de cromatografia líquida de alta eficiência o mel e o hidromel seco e suave, comercializados na cidade de Dourados – MS. As análises foram realizadas pelo processo de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência – HPLC. Conforme os resultados experimentais, os hidroméis do tipo seco e suave apresentaram resultados que diferem entre si e entre as diferentes colunas de 55°C e 25°C. Já o mel apresentou maiores valores para maltose, glicose e frutose, conforme o que já era esperado, pois o mel serve como matéria prima para formulação do hidromel, tendo maior quantidade de açúcares. Observação semelhante foi constatada no hidromel suave, que passa pelo processo de fermentação, porém em sua formulação difere-se do seco em relação à quantidade

de açúcares e modo de fermentação.

PALAVRA CHAVE: Mel, Bebida Fermentada, Hidromel, Análise Físico-Química.

ABSTRACT: Honey is a major commercial food product produced by bees. Some regions, its use is used mostly as a natural medicine. Hydromel is an alcoholic beverage resulted from the fermentation of honey and it can be classified in different ways according to its manufacture. This drink has a secondary role in the beekeeping activity and it has as main role in the production of honey. However, the economic importance is still relevant considering the values that this product may have in the market. The objective of this work is to characterize honey, dry and mild mead commercialized in the city of Dourados - MS. The analyzes were carried out by the High-performance Liquid Chromatography process. According to the experimental results, the dry and soft type mead showed results that differed from each other and between the different columns of 55°C and 25°C. The honey showed higher values for maltose, glucose and fructose, according to what was expected, since honey serves as a raw material for mead production and it has a higher amount of sugars. The same is observed in the soft mead which passes through the fermentation process, but it is a different formulation from the dry one in relation to the amount of sugars and type of fermentation.

KEYWORDS: Honey, Fermented Beverage, Mead, Physical-chemical analyzes.

INTRODUÇÃO

O mel é uma substância produzida por abelhas que tem sido usada há séculos como alimento, uma de suas possíveis aplicações é na produção de bebidas, podendo fazer uso da fermentação, para produzir diferentes tipos de hidromel, que podem ter sabores diferentes dependendo da origem floral do mel e dos aditivos e leveduras utilizados no processo fermentativo (Moura 2010).

A produção de mel tem grande destaque no cenário mundial, devido à importância econômica significativa que este produto possui em vários países, diversos estudos sobre o assunto foram publicados, principalmente sobre os benefícios do mel para a saúde. No entanto, existem poucos estudos científicos sobre os produtos derivados do mel, como o hidromel (Roldán et al., 2011).

O Brasil produz cerca de 50 mil toneladas de mel, contudo, sua produção poderia ser de 200 mil toneladas, principalmente se o mercado nacional fosse expandido. O consumo em média no Brasil é de 120 g/pessoa/ano de mel, enquanto que países como a Alemanha o consumo chega a 3,4 kg/pessoa/ano. Considera-se que o consumo do mel no país seja muito baixo, devido ao fato de sua forte associação a categoria de medicamento e não apenas a alimento, em virtude deste fato, seu consumo não apresenta um crescimento (Pasin et al., 2012).

Segundo Brasil (2009) a elaboração do hidromel ocorre a partir da fermentação de mel, água e levedura, este processo gera um teor alcoólico na bebida que varia entre 4 e 14% (v/v), e pode ser adicionado de suco de frutas, ácido cítrico, ervas e especiarias. O hidromel é conhecido há milhares de anos, desde as antigas civilizações, onde era empregado em

rituais de diversas culturas, como bebida afrodisíaca, chamado de bebida da “lua de mel”, além de ser apreciado como bebida alcoólica (Navrátil et al., 2001).

Essa bebida tem papel secundário na atividade apícola, que tem como atividade principal a produção do mel, porém, sua importância econômica ainda é relevante, em consideração aos valores que este produto pode ter no mercado. Segundo Mattietto (2006) o poder de compra que este produto pode obter no mercado externo pode variar entre US\$ 11 a US\$ 20 para garrafa de 750 mL até US\$ 70 para produtos com melhor refino, considerada linha Premium. No mercado interno a garrafa de 750 mL pode custar em média R\$ 50,00, assim, é um produto com valor econômico agregado e pode se tornar uma atividade econômica viável para o produtor. Conforme Pereira (2014), assim, a produção do hidromel, pode ser considerada uma das alternativas para os produtores de mel, com incremento da renda e até mesmo um incentivo para que os apicultores consigam superar as dificuldades financeiras.

Acerca dos aspectos produtivos, este produto apesar de ser uma das bebidas alcoólicas mais antigas, é produzido de uma forma empírica e artesanal, deparando-se o apicultor com inúmeros problemas durante a fermentação, fato que, ressalta a necessidade de pesquisas para melhorar a produção e diminuir os custos em etapas como, a seleção de agente de fermentação, formulação e definição de padrões de identidade e qualidade do produto (Berry, 2007).

A atividade apícola na região de Dourados é baixa, contudo, encontra-se em um período de expansão. Roldán (2011) ressalta que a produção de mel de qualidade no mercado brasileiro sofre com a grande concorrência dos países da América do Sul, nos quais, os custos de produção são menores, fato que, permite que esses produtos sejam comercializados abaixo dos custos do produto brasileiro. Assim, há necessidade de que o produto nacional seja valorizado e, se encontre alternativas na produção e industrialização com maior aceitabilidade no mercado.

Com base neste contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar por meio de análise de cromatografia líquida de alta eficiência o mel, hidromel seco e suave, comercializados em Dourados – MS.

MATERIAIS E MÉTODOS

O mel, hidromel seco e suave foram doados por empresa localizada em, Dourados - MS. As análises foram realizadas nos laboratórios da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados (FAEN-UFGD).

Na cromatografia líquida de alta eficiência - HPLC, o sobrenadante foi utilizado para determinar substrato residual, etanol, glicerol e ácidos orgânicos por UPLC Agilent 1290, equipado com coluna Rezex ROA–Organic Acid H+(8%) (Phenomenex). A fase móvel utilizada foi ácido trifluoroacético (TFA) a 0,005 M, a uma vazão de 0,6 mL min⁻¹, com temperatura de 55°C e o volume injetado foi de 20 µL. Estes compostos foram detectados por um detector refratômetro, diferencial Agilent 1260 (RID), acoplado a um módulo de aquisição de dados (adaptado de FONSECA *et al.*, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela cromatografia líquida de alta eficiência, são expressos na tabela 1. Nelas foram analisadas amostras de Mel, Hidromel Seco e Hidromel Suave, para Maltose, Glicose, Frutose, Lático, Glicerol, Acético e Etanol.

Análises	Mel	Hidromel seco	Hidromel suave
Maltose g/L	143,34	28,47	46,39
Glicose g/L	318,52	16,79	26,80
Frutose g/L	403,48	27,38	73,46
Lático g/L	-	0,43	1,60
Glicerol g/L	-	11,03	11,64
Acético g/L	-	0,91	-
Etanol g/L	-	121,98	92,22

(-) representa que a análise não foi realizada para esta amostra

Tabela 1: Resultados obtidos pela análise de HPLC (55 °C 0.6)

Os resultados obtidos na análise de 55°C a 0,6 mL.min⁻¹ do HPLC, expressos na Tabela 1, demonstraram que o mel apresentou maiores valores para maltose, glicose e frutose, não apresentando leituras para ácido lático, glicerol, ácido acético e etanol. Pereira (2014) determinou valores de 105,10 g/L para frutose e 85,76 g/L para Glicose, sendo assim menores que os do presente trabalho.

O hidromel seco obteve maior índice de etanol apresentando 121,98 g/L, tendo assim uma diferença significativa entre o hidromel seco, esse dado é superior ao obtido por Pereira (2014) que determinou variação de etanol entre 10 a 12 g/L. Todas as amostras obtiveram um grande índice de variação, com valores próximos apenas na quantidade de glicerol.

Todas as amostras obtiveram um grande índice de variação, com valores próximos apenas na quantidade de glicerol.

A glicose obteve maior índice no mel 318,52 g/L, seguindo pelo hidromel suave 26,80 g/L e o hidromel seco 16,79 g/L o que já era esperado, pois a glicose representa a quantidade de açúcar presente na amostra. Pereira (2014) determinou 85,77 g/L para mel e 2,64 g/L para hidromel. A diferenciação dos dados amostrados frente à literatura se justifica pelas condições de execução dos experimentos, bem como a concentração das amostras.

Qualitativamente as amostras de hidromel seco e hidromel suave apresentaram respectivamente valores para ácido lático 0,43 g/L e 1,60 g/L; glicerol 11,03 g/L e 11,64 g/L; etanol 121,98 g/L e 92,22 g/L, a presença desses compostos é justificada pelo processo de

fermentação que ocorre para obtenção do hidromel.

Segundo Pereira (2014) a presença do ácido acético pode ser um indicativo da presença de melato, no entanto a ausência dele nas demais amostras indica a presença devido a formulação específica do tipo de hidromel.

Na Tabela 2, é possível observar os resultados obtidos para a cromatografia líquida de alta eficiência de 25 °C a 0,3 mL.min⁻¹ para mel, hidromel seco e hidromel suave. Para leitura foram utilizadas colunas com identificação de maltose/sacarose, glicose e frutose.

Análises	Mel	Hidromel seco	Hidromel suave
Maltose/Sacarose g/L	1623	26,15	77,94
Glicose g/L	1486	16,17	270,17
Frutose g/L	2963	70,02	383,47

Tabela 2: Resultados obtidos pela análise de HPLC (25 °C 0.3)

Na Tabela 2 é possível identificar que o mel, obteve maiores quantidade da maltose/sacarose, glicose e frutose, o que já era esperado pois serve como matéria prima para formulação do hidromel, seguido do hidromel suave e o seco, semelhante ao observado por Fleet (1997), em seu estudo.

Maltose, glicose e frutose apresentaram valores elevados no mel em comparação com a Tabela 1, hidromel seco apresentou valores similares em maltose e glicose, porém superior em relação a quantidade de frutose presente. Para o hidromel suave foi encontrado valores significativamente superiores nos três compostos em relação ao parâmetro anterior.

CONCLUSÃO

A análise de cromatografia de alta eficiência demonstrou que o mel apresentou maiores valores para maltose, glicose e frutose, sucessivamente, pelo hidromel suave e pelo hidromel seco. O que já era esperado, pois o mel serve como matéria prima para formulação do hidromel, tendo maior quantidade de açúcares. Observação semelhante foi encontrada para hidromel suave, que passa pelo processo de fermentação, porém, em sua formulação difere do seco em relação a quantidade de açúcares e modo de fermentação. Foi possível ainda analisar outros componentes presentes na formulação dos dois tipos de hidromel como ácido láctico, glicerol e etanol.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Decreto nº6871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas pela Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994. **Diário Oficial da União. Brasília, DF: Secretaria de Vigilância Sanitária, 2009.**

BERRY, B. **The global mead market**: opportunities for canadian mead exporters. Ottawa, Ontário;

Agriculture and Agri-Food Canada, 2007. Disponível em: <<http://www.agr.gc.ca/eng/programs->

and-services/list-of-programs-and-services/agri-foodtrade-service/?id=1410965065217>. Acesso em: 10 de maio de 2018.

FLEET, G. H. The microbiology of alcoholic beverages. **Microbiology of Fermented Foods** (pp. 217-262). Brian J. B. Wood, 1997

FONSECA, G. G.; DE CARVALHO, N. M. B.; GOMBERT, A. K. Growth of the yeast *Kluyveromyces marxianus* CBS 6556 on different sugar combinations as sole carbon and energy source. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 11, p. 5055–5067, 2013.

MATTIETTO, R. A.; LIMA, F.; VENTURIERI, G. C.; ARAÚJO, A. A. de. Tecnologia para obtenção artesanal de hidromel do tipo doce. Belém: **Embrapa Amazônia Oriental**, 2006. MOURA, S. G. Boas práticas apícolas e a qualidade do mel das abelhas, pós-graduação em ciência animal, **Centro de ciências agrárias – Universidade Federal do Piauí**, Brasil, 2010. NAVRÁTIL, M.; STURDÍK, E.; GEMEINER, P. Batch and continuous mead production with pectate immobilised, ethanol-tolerant yeast. **Biotechnology Letters**, v.23, p.977-982, 2001. PASIN, L. E. V.; TERESO, M. J. A.; BARRETO, L. M. R. C. Análise da produção e comercialização de mel natural no Brasil no período de 1999 a 2010. **Agroalimentaria**, v. 18, n. 34, 29-42, 2012. Available at: <<http://hdl.handle.net/11449/73436>>

PEREIRA, A. F. **Otimização da produção de vinagre de mel**. Dissertação - Instituto politécnico de Bragança, Branca 2014.

ROLDÁN, A., MUISWINKEL, G.C.J. VAN, LASANTA, C., PALACIOS, V., CARO, I. Influence of pollen addition on mead elaboration: Physicochemical and sensory characteristics. **Food Chemistry**, v.126, p.574–582, 2011.

ESTUDO DA PRODUÇÃO DE PRODUTOS DE EXTRATOS ALCOÓLICOS CONCENTRADOS E DE ÁLCOOL GEL A PARTIR DE DESCARTES DE BEBIDAS ALCOÓLICAS

Data de aceite: 19/06/2020

Pierre Correa Martins

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Gabriel Alexandre Clemente Amaral

Amaral, Departamento de Engenharia de
Alimentos, Universidade Federal da Paraíba,
João Pessoa - PB

Pedro Passador Bittencourt de Sá

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

João Alves de Medeiros Neto

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Heloísa Barbosa de Oliveira

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Lara Patrício Ferreira

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Daniel Felipe Lima Soares

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Nilmara Beatriz Sousa de Oliveira

Departamento de Engenharia de Alimentos,

Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Raquel de Medeiros Barreto

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Thayze Rodrigues Bezerra Pessoa

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Joselma Araújo de Amorim

Departamento de Engenharia de Alimentos,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

Vital de Souza Queiróz

Departamento de Engenharia Química,
Universidade Federal da Paraíba, João
Pessoa - PB

RESUMO: o objetivo desse trabalho foi estudar a produção de extratos alcoólicos concentrados (75 a 80 °GL) e de álcool gel a partir dos descartes alcoólicos cedidos pelos órgãos da Receita Federal de Recife/PE e de João Pessoa/PB. Os descartes alcoólicos foram destilados em bateladas em coluna experimental piloto. Seu monitoramento foi realizado através de curvas experimentais operacionais (volume e graduação alcoólica dos destilados, temperatura e tempo de destilação) e das determinações de

gradação alcoólica, pH e densidade das soluções alcoólicas. O estudo da formulação de álcool gel foi efetuado através de um delineamento experimental estatístico com composto central e rotacional (DCCR) do tipo 2^3 , cuja base mássica foi o extrato a 76 °GL. As variáveis de estudo foram as proporções mássicas dos seus componentes (carbopol, trietanolamina e glicerina) e os parâmetros de avaliação foram os resultados de pH e viscosidade do produto. Os extratos produzidos apresentaram concentração alcoólica de $77,7 \pm 1,5$ °GL, pH de $5,5 \pm 0,1$ e densidade de $0,833 \pm 0,04$ g/cm³. O rendimento operacional da destilação foi de $60,2 \pm 0,8\%$ em volume de álcool anidro extraído. A faixa otimizada da proporção mássica encontrada para a formulação de álcool gel foi de 0,7 a 0,85% em peso de carbopol, 0,07 a 0,09% em peso de trietanolamina e 0,16 a 0,18% em peso de glicerina para um produto com pH de 5,5 e viscosidade de 20.000 cP. Os extratos alcoólicos concentrados e o álcool gel produzidos são adequados para assepsia de ambientes, bancadas de laboratório e outros.

PALAVRAS-CHAVE: destilação, resíduos alcoólicos, sanitizantes.

STUDY ON THE PRODUCTION OF CONCENTRATED ALCOHOLIC EXTRACTS AND ALCOHOL GEL FROM ALCOHOLIC BEVERAGE WASTE

ABSTRACT: the objective of this work was to study the production of concentrated alcoholic extracts (75 to 80 °GL) and alcohol gel from alcoholic discards provided by the agencies of the Receita Federal of Recife/PE and João Pessoa/PB. The alcoholic discards were distilled in batches in a pilot experimental column. Its monitoring was carried out through experimental operational curves (volume and alcoholic strength of distillates, temperature and distillation time) and determinations of alcoholic strength, pH and density of alcoholic solutions. The study of the alcohol gel formulation was carried out through a statistical experimental design with central and rotational compound (DCCR) type 2^3 , whose mass base was the extract at 76 °GL. The studies of variables were the mass proportions of its components (carbopol, trietanolamine and glycerin) and the evaluation parameters were the results of pH and product viscosity. The extracts produced had an alcoholic concentration of 77.7 ± 1.5 °GL, pH of 5.5 ± 0.1 and density of 0.833 ± 0.04 g/cm³. The operational yield of the distillation was $60.2 \pm 0.8\%$ in volume of anhydrous alcohol extracted. The optimized mass ratio range found for the alcohol gel formulation was 0.7 to 0.85% by weight of carbopol, 0.07 to 0.09% by weight of trietanolamine and 0.16 to 0.18% by weight in glycerin for a product with a pH of 5.5 and a viscosity of 20,000 cP. The concentrated alcoholic extracts and alcohol gel produced are suitable for asepsis of public, laboratory bench and other environments.

KEYWORDS: distillation, alcoholic waste, sanitizers.

1 | INTRODUÇÃO

A utilização dos descartes alcoólicos cedidos pela Receita Federal (RF) para a produção de produtos sanitizantes que possam ser utilizados pela população é uma otimização do processo de destinação ao qual às mercadorias apreendidas por esse órgão fiscalizador são submetidas. Atualmente os destilados e fermentados alcoólicos apreendidos pela RF e identificados por testes qualitativos de controle como impróprios para consumo

são descartados ao ambiente em locais apropriados (ANDRZEJEWSKI; VIEIRA, 2015). No entanto, tais descartes que contêm etanol podem servir para elaboração de produtos de higiene, produção de combustíveis e demais produtos a base de álcool. Essas ações contribuem para o aprimoramento dos controles sanitários, fitossanitários, zoossanitários, do desenvolvimento social sustentável e do cumprimento das legislações de proteção ao meio ambiente, à saúde e à segurança pública. O álcool concentrado, com graduação igual ou superior a 70 °INPM ou 76 °GL, é um agente desinfetante que pode ser utilizado em diversos ambientes coletivos (praças de alimentação, banheiros públicos, transportes coletivos, etc.) e muito utilizado em repartições de saúde pública, como hospitais, ambulatórios médicos, postos de saúde e outros (ANVISA, 2002).

A literatura apresenta diversas formulações para a produção de álcool gel, utilizando diferentes componentes e em amplas faixas de proporções. O principal constituinte do álcool gel é o etanol hidratado com concentração mínima de 70 °INPM ou 76 °GL, o qual apresenta ação asséptica de inibir a atividade de vários microrganismos que provocam enfermidades aos seres humanos. A solução alcoólica na forma de gel é obtida através da adição de espessantes para obter uma estrutura física coloidal e gelatinosa do produto. Por fim, faz-se o uso de um agente umectante para minimizar qualquer ação de ressecamento da pele no contato com esse produto. Geralmente esses componentes são representados comercialmente pelos carbômeros (carbopol e outros), acrescidos de reguladores de pH (trietalonamina e outros) e de materiais hidrofílicos (glicerina e outros).

O objetivo desse trabalho é a produção de extratos alcoólicos concentrados a partir de descartes de bebidas alcoólicas fornecidos por órgãos da Receita Federal brasileira de Recife/PE e de João Pessoa/PB e de álcool gel comparando os produtos obtidos com seus comerciais similares que atendem a legislação vigente e se encontram disponíveis a população brasileira.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os produtos alcoólicos foram obtidos a partir dos descartes das bebidas alcoólicas fornecidas pela Superintendência Regional da Receita Federal do Brasil na 4ª Região Fiscal (SRRF04) e pela Delegacia da Receita Federal de João Pessoa/PB (DRJ/JP), conforme suas diretrizes de destinação de mercadorias apreendidas. A Figura 1 apresenta esses descartes alcoólicos acondicionados em vasilhames de 10 litros separados em duas classes: a) descartes de bebidas alcoólicas fermentadas (faixa de 8 a 20 °GL); b) descartes de bebidas alcoólicas destiladas (superior a 20 °GL).



Figura 1: Descartes alcoólicos destilados e fermentados cedidos pelos órgãos da Receita Federal brasileira do Recife/PE e de João Pessoa/PB.

Fonte: Autor (2020).

O álcool gel foi obtido a partir do uso de extratos alcoólicos concentrados a 76 °GL produzidos através da destilação desses descartes alcoólicos em uma torre experimental piloto de destilação.

Os reagentes químicos utilizados para se obter esse produto foram o carbopol, trietanolamina e glicerina, adquiridos no mercado varejista local. Todas as atividades experimentais foram desenvolvidas no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) do Centro de Tecnologia (CT/UFPB).

Metodologia experimental

Foram realizadas determinações de concentração alcoólica, utilizando um alcoolômetro (modelo *Gay-Lussac* e *Carrier* 20 °C, marca Incoterm®, Brasil) e metodologia oficial da ABNT NBR 5992 de 2008; densidade, através de picnometria líquida (picnômetro de 50 mL, marca DiogoLab®, Brasil) e metodologia de Webb (2001); pH, com uso de um medidor de pH automático de bancada (modelo MPA-210/MPA 210-P, marca Tecnopon®, Brasil).

Produção de extratos alcoólicos concentrados

A destilação dos descartes alcoólicos foi realizada com uma mistura de descartes alcoólicos de destilados a 43 °GL, com uma mistura de descartes alcoólicos destilados e fermentados a 38 °GL e com uma mistura de descartes alcoólicos destilados e descartes alcoólicos remanescentes das destilações anteriores a 33 °GL. As soluções alcoólicas foram destiladas em bateladas de 15 a 20 litros na faixa operacional de temperatura de 82 a 90 °C a pressão local ambiente (1atm abs.). A produção dos extratos alcoólicos foi realizada em uma coluna piloto experimental, cujo volume operacional deve ser na faixa de 15 a 25 litros de solução.

O rendimento operacional percentual das bateladas de destilação foi determinado através da relação volumétrica entre o volume de álcool anidro presente na mistura e no seu destilado, representando o volume de álcool extraído, e obtido pela equação 1.

$$RO = \left[\frac{V_{destilado} \times \left(\frac{{}^{\circ}GL_{destilado}}{100} \right)}{V_{mistura} \times \left(\frac{{}^{\circ}GL_{mistura}}{100} \right)} \right] \times 100 \quad \text{eq.1}$$

onde: RO é o rendimento operacional volumétrico de álcool anidro extraído (%); V é o volume de solução (litros); °GL é a concentração volumétrica percentual de álcool na solução ou grau *Gay-Lussac*.

As curvas experimentais dos parâmetros de monitoramento da destilação (volume e concentração alcoólica dos destilados, tempo e temperatura de operação) foram obtidas através de periódicas medidas do volume de destilado coletado em relação ao tempo e a temperatura de operação e das respectivas determinações de graduação alcoólica realizadas nesses destilados.

Produção de álcool gel

A produção do álcool gel foi realizada, de forma geral, segundo o fluxograma operacional simplificado apresentado na Figura 2.

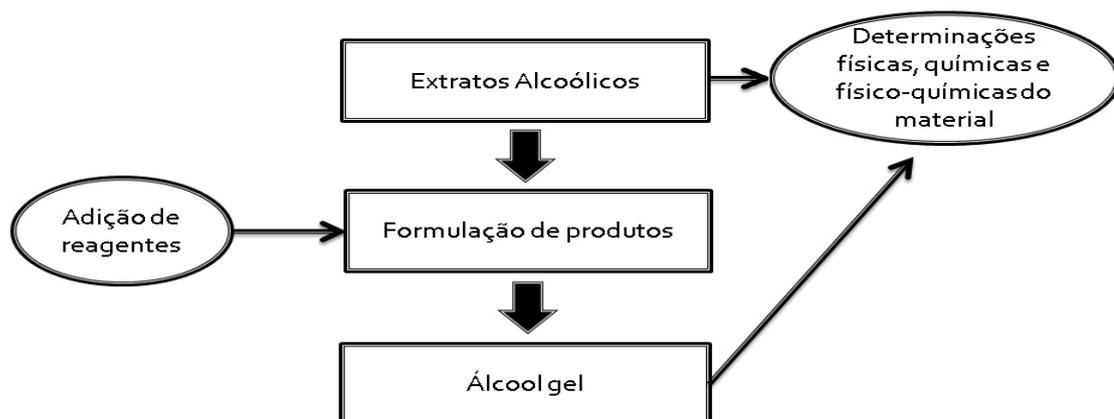


Figura 2: Fluxograma simplificado da produção de álcool gel.

Fonte: Autor (2020).

A determinação de graduação alcoólica dos descartes alcoólicos e dos extratos alcoólicos foi realizada com uso de um alcoolômetro (modelo *Gay Lussac* e *Carrier 20 °C*, *Incoterm*, Brasil), segundo metodologia oficial brasileira (ABNT NBR 5992 de 2008).

A viscosidade do álcool gel foi realizada em viscosímetro rotativo analógico do tipo *Brookfield* (modelo Q860A, marca Quimis, Brasil) com a sonda (*spindle*) nº4 a 12 rpm.

O procedimento aplicado para a produção do álcool foi o seguinte:

a) Inicialmente se determinou a quantidade de massa de extrato alcoólico utilizado com base de cálculo e massa de produto de cada ensaio. Ela foi arbitrada em 340 g de extrato alcoólico a 76 °GL, a qual corresponde a 350 mL de solução alcoólica com concentração

alcoólica de 71 °INPM a 25 °C.

b) As massas dos seus componentes foram quantificadas através das suas faixas mássicas proporcionais adotadas para o estudo da formulação do produto, baseadas na quantidade mássica do álcool a 76 °GL, e posteriormente pesadas. A trietalonamina e a glicerina estão apresentadas na forma líquida, portanto foram determinadas as massas de cada gota desses componentes, manipulando-as em uma pipeta de 1 mL, para controlar a sua quantidade desejável de adição a mistura.

c) O extrato alcoólico concentrado foi agitado em um béquer de 400 mL com um agitador de hélice (modelo Q235-2, marca Quimis, Brasil) ao nível máximo de agitação do equipamento. Logo em seguida, adicionou-se o carbopol e manteve-se a mistura em agitação por 20 min. O próximo componente adicionado foi a trietalonamina, mantendo-se a mistura dos três componentes (álcool/carbopol/trietalonamina) em agitação por 3 min. Após, adicionou-se a glicerina e manteve-se a mistura de todos componentes em agitação por 3 min. O produto final foi armazenado em frascos de vidro de 500 ml em condições herméticas (frascos com tampa).

Para o estudo da formulação do álcool gel foi utilizado um planejamento experimental fatorial para avaliar uma ampla faixa de valores das variáveis de estudo e para indicar uma faixa de operação para os parâmetros de avaliação adotados. Portanto, foi aplicado um delineamento experimental fatorial rotacional com composto central, denominado DCCR, com 5 pontos centrais e 6 pontos axiais, conforme as informações de Rodrigues e Lemma (2005). Esse desenho do delineamento estatístico experimental é adotado para se obter uma curvatura de suas superfícies de respostas e de suas curvas de níveis para a possível verificação, visualização da região de ótimo para seus parâmetros de avaliação, denominados de respostas do planejamento.

A Tabela 1 apresenta as variáveis de estudo e os seus níveis de variação para o estudo da formulação do álcool gel (segundo as proporções de seus componentes de estudo) na forma codificada com seus respectivos valores operacional para o delineamento estatístico adotado.

Níveis de variação codificados das variáveis	Variáveis e suas proporções mássicas (p/p)		
	Trietalonamina	Glicerina	Carbopol
-1,73 (- α)	0,033	0,070	0,676
-1	0,042	0,105	0,730
0	0,070	0,150	0,805
1	0,092	0,200	0,880
1,73 (+ α)	0,110	0,230	0,935

Tabela 1: Variáveis e níveis de variação do planejamento experimental 2^3 com composto central e rotacional (DCCR) para a determinação da faixa ótima de formulação do álcool gel.

Fonte: Autor (2020).

Os parâmetros de avaliação da operação ou resposta do DCCR são as determinações

de pH e viscosidade dos produtos obtidos. Os resultados do tratamento estatístico adequado aplicado ao DCCR utilizaram o nível de significância dos testes de 5% (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção dos extratos alcoólicos concentrados

Os resultados das determinações de graduação alcoólica, pH, densidade e do volume utilizado das misturas alcoólicas submetidas as bateladas de destilação estão apresentados na Tabela 2.

Mistura alcoólica (tipo de solução)	Volume utilizado (litros)	Teor aslcoólico (°GL)	pH	Densidade (g/cm ³)
Descarte dos destilados (uísque)	15,0	43	4,1 ± 0,1	0,951 ± 0,001
Descartes dos destilados com os fermentados (uísques e vinhos)	17,5	38	3,9 ± 0,1	0,984 ± 0,001
Descartes dos destilados com os descartes das destilações (uísques e soluções alcoólicas)	19,5	34	4,3 ± 0,1	0,964 ± 0,001

Tabela 2: Resultados do volume, graduação ou teor alcoólico, pH e densidade das misturas alcoólicas submetidas a destilação em uma coluna piloto experimental para produção de extratos alcoólicos concentrados.

Fonte: Autor (2020).

Os resultados da Tabela 2 demonstram as características dos componentes das misturas alcoólicas utilizadas. Os destilados do tipo uísque apresentam basicamente álcool e água em sua composição e seus valores de graduação alcoólica, pH e densidade estão nas faixas de 40 a 44 °GL, 4,0 a 4,5 e 0,900 a 0,970 g/cm³, respectivamente, conforme as informações de Russell, Bamforth e Stewart (2003). As informações da literatura relatam situação similar para os vinhos que apresentam faixas de pH, graduação alcoólica e densidade iguais a 3,72 a 3,95, 11,5 a 13,5 °GL e 0,966 a 0,998 g/cm³, segundo De Oliveira, De Souza e Mamede (2011). Portanto, as misturas alcoólicas utilizadas se situam nessas faixas de pH, concentração alcoólica e densidade. Em relação à graduação alcoólica, deve-se necessariamente utilizar misturas com concentrações alcoólicas iguais ou superiores a 30 °GL para o uso da coluna experimental piloto. Isto decorre da observação experimental de dois fatos: a) o equipamento não produziu destilados com concentrações inferiores a 20 °GL nas bateladas de destilação dos descartes alcoólicos dos destilados a 43 °GL; b) as soluções remanescentes desses ensaios de destilação que ficaram no vaso da coluna apresentaram

concentrações alcoólicas na faixa de 20 a 28 °GL. Portanto, esse comportamento experimental do equipamento inviabiliza a destilação isolada dos descartes fermentados (composta de vinhos e espumantes), devendo-se adicionar soluções alcoólicas mais concentradas aos mesmos para garantir êxito de operacionalidade produtiva dos extratos alcoólicos concentrados. A faixa de graduação alcoólica dos destilados mais diluídos, que compõe os descartes alcoólicos das destilações das misturas apresenta uma amplitude representativa de graduação alcoólica de 43 a 66 °GL. Porém, o volume de destilados descartados para a produção de extratos concentrados é baixo ou desprezível (0,1 a 1,3 litros) e muito inferior (na ordem 10 a 12 vezes menor) ao volume das soluções remanescentes que ficam no vaso de destilação (10 a 13 litros). Os descartes das destilações são compostos pelas soluções remanescentes e os destilados descartados das suas respectivas bateladas.

Os resultados do monitoramento das bateladas de destilação dos diferentes tipos de misturas alcoólicas utilizadas estão apresentados na Figura 3

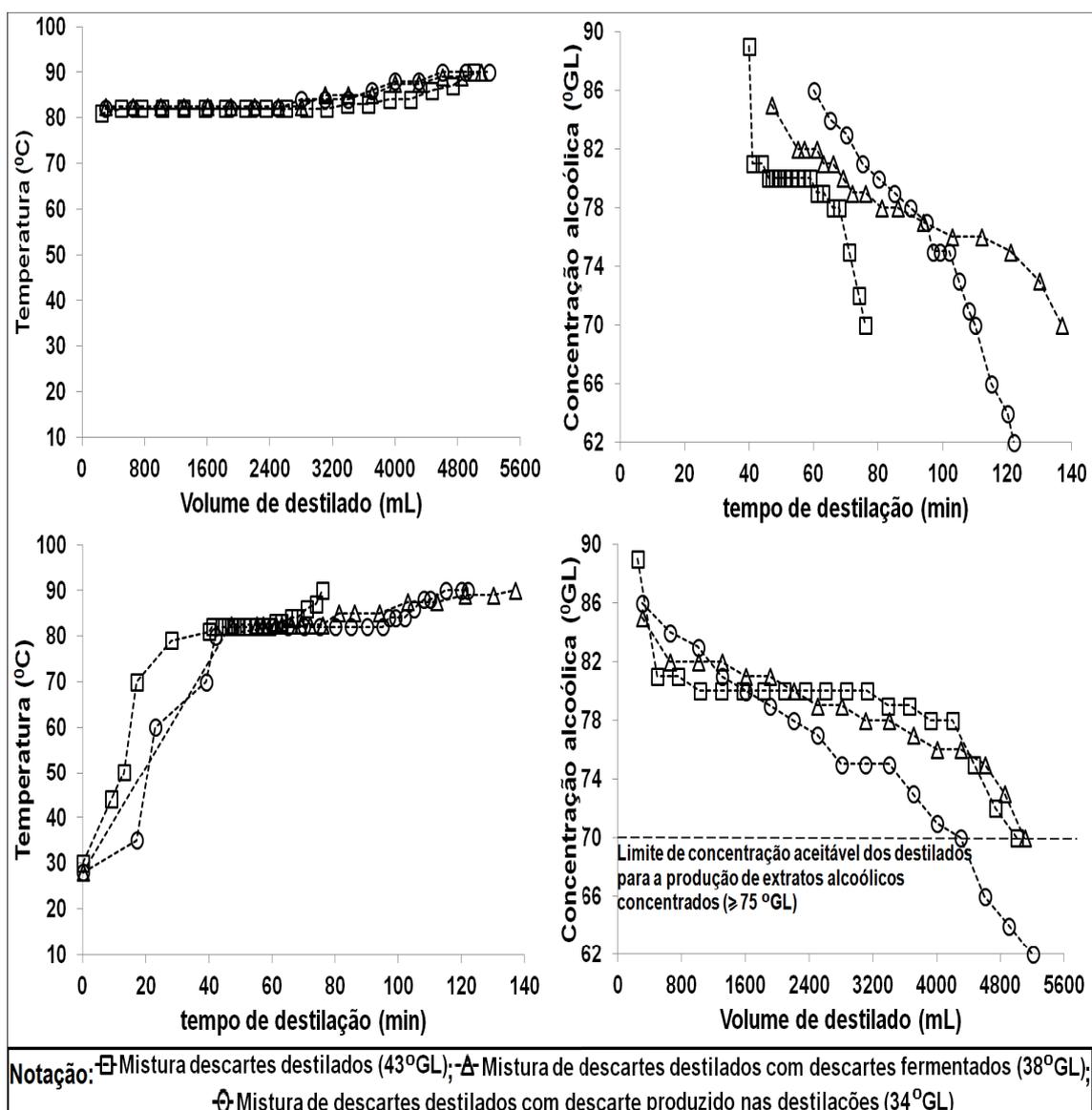


Figura 3: Relações dos parâmetros operacionais de monitoramento das bateladas de destilação das diferentes misturas alcoólicas utilizadas para produção dos extratos alcoólicos.

Fonte: Autor (2020).

Observa-se na Figura 3 que a produção de extratos alcoólicos concentrados se inicia a partir da mistura atingir a temperatura de 82 °C e finaliza a 90 °C. Essa coleta de destilado ocorre mais brevemente para as misturas com maior teor alcoólico, iniciando aos 40 min e aos 60 min para as misturas contendo 43 °GL e 34 °GL, respectivamente. O período de produção dos destilados é maior para as misturas com menor concentração alcoólica, sendo de 65 min para a mistura de 30 °GL e de 36 min para o material com 43 °GL. Verifica-se que a concentração alcoólica dos extratos produzidos diminui em relação ao tempo e ao volume de coleta dos destilados. Observa-se que a graduação alcoólica dos destilados se encontra em um intervalo de 90 a 70 °GL para as misturas com maior concentração alcoólica (43 e 38 °GL), ampliando-o até 62 °GL para a mistura com menor concentração de álcool (34 °GL). Os extratos alcoólicos produzidos com misturas de maior concentração alcoólica apresentam conteúdos de alcoólicos maiores e mais uniformes no decorrer da destilação. Os extratos alcoólicos desejáveis são os destilados que apresentam concentração alcoólica igual ou superior a 70 °GL, pois esse é o valor limite para uma mistura de destilados coletados que produz extratos com teor alcoólico desejável (igual ou superior a 75 °GL) em função dos seus respectivos volumes e concentrações alcoólicas obtidas.

A Tabela 3 apresenta os resultados de volume coletado, concentração alcoólica, pH e densidade dos extratos alcoólicos concentrados produzidos.

Procedência dos extratos alcoólicos concentrados	Volume produzido (litros)	Graduação alcoólica (°GL)	pH	Densidade (g/cm ³)
Descarte dos destilados (43 °GL)	5,0	79,0	6,2 ± 0,1	0,827 ± 0,001
Descartes dos destilados com os fermentados (38 °GL)	5,1	78,7	5,6 ± 0,1	0,830 ± 0,001
Descartes dos destilados com os descartes das destilações (34 °GL)	5,2	75,4	5,4 ± 0,1	0,837 ± 0,001

Tabela 3: Resultados do volume, graduação alcoólica, pH e densidade dos extratos alcoólicos concentrados obtidos da destilação das misturas alcoólicas compostas pelos descartes alcoólicos.

Fonte: Autor (2020).

Observa-se na Tabela 3 que o volume produzido de extrato alcoólico concentrado foi similar para as três misturas alcoólicas utilizadas. A graduação alcoólica dos destilados aumentou conforme a procedência do teor alcoólico das suas misturas de origem: maior teor alcoólico inicial resultou em maior teor alcoólico final. O pH e a densidade dos destilados produzidos segue um comportamento similar ao encontrado para as soluções aquosas de etanol: a medida que a proporção de álcool dos destilados aumenta os seus valores de pH

umentam e de densidade diminuem. Isto se deve ao fato de que o pH e densidade do etanol anidro estão nas faixas de 7,00 a 7,25 e a 0,775 a 0,780 g/cm³ enquanto a água destilada presente nos descartes apresenta valores de 5,6 a 5,8 e 0,996 a 0,997 g/cm³, a temperatura de 25 a 30 °C. Os resultados do rendimento operacional das bateladas de destilação das misturas utilizadas para a produção dos extratos alcoólicos concentrados estão na Tabela 4.

Mistura alcoólica (tipo de solução)	Rendimento operacional (%)
Descarte dos destilados (uísque, 43 °GL)	61,24
Descartes dos destilados com os fermentados (uísques e vinhos, 38 °GL)	60,35
Descartes dos destilados com os descartes das destilações (uísques e soluções alcoólicas, 34 °GL)	59,14

Tabela 4: Resultados do rendimento operacional das bateladas de destilação das misturas alcoólicas utilizadas para produzir os extratos alcoólicos concentrados.

Fonte: Autor (2020).

As misturas alcoólicas mais concentradas apresentam maior disponibilidade de álcool para a sua extração e maior rendimento operacional, conforme os resultados da Tabela 4. Este comportamento é amplamente predito pela lei de Fick para transferência de massa e pode indicar que os parâmetros de transporte mássico de álcool das diferentes misturas utilizadas apresentem valores similares ou de mesma ordem de grandeza. Algumas características de qualidade (gradação alcoólica, pH, densidade) de produtos alcoólicos foram utilizadas para comparar o extrato obtido aos seus similares comercializados no mercado varejista local e estão apresentados na Tabela 5.

Produto alcoólico	°GL	ρ (g/cm ³)	pH
Extrato alcoólico concentrado produzido ⁱ	77,7 ± 1,5	0,83 ± 0,004	6,2 ± 0,01
Etanol comercial de uso doméstico da marca 1	58	0,89 ± 0,001	7,2 ± 0,01
Etanol comercial uso doméstico da marca 2	96	0,79 ± 0,001	6,2 ± 0,01
Etanol comercial de uso em laboratório (PA)	98	0,80 ± 0,001	7,2 ± 0,01

ⁱ Expressa os valores médios das características dos extratos obtidos de todas as misturas utilizadas.

Tabela 5: Características de qualidade dos extratos alcoólicos concentrados produzidos e de produtos comerciais alcoólicos similares obtidos no mercado varejista local de João Pessoa/PB.

Fonte: Autor (2020).

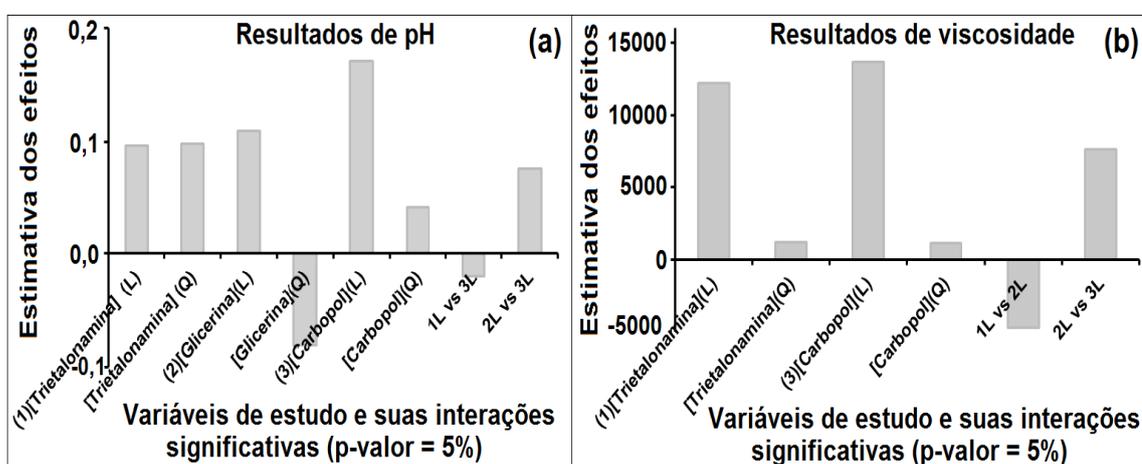
Os extratos alcoólicos concentrados produzidos apresentaram valores de pH e de densidade relacionados ao seu conteúdo de álcool de forma similar aos produtos alcoólicos comerciais que utilizam água destilada para sua produção, conforme as informações da Tabela 5. O etanol comercial da marca 1 indica que seu fabricante utiliza água neutra (pH em torno de 7,0) para a sua produção, portanto seu pH é neutro. Assim, os concentrados

alcoólicos obtidos podem realizar ações de limpeza e assepsia análogas às desempenhadas pelos produtos comerciais de uso doméstico.

Produção de álcool gel

As faixas de pH e de viscosidade dos produtos obtidos nos ensaios de formulação de álcool gel foram de 5,0 a 5,8 e de 8.125 a 38.875 cP, respectivamente. Os resultados demonstraram que o aumento das proporções dos componentes resulta em um aumento da viscosidade e do pH do produto. Portanto, desejou-se obter um álcool gel com um pH próximo da neutralidade (7,0) e uma viscosidade igual ou superior a 8.000 cP, segundo legislação brasileira, e inferior a 30.000 cP para que o produto não se torne muito adesivo a sua manipulação e forme grumos de gel.

A Figura 4 apresenta a forma gráfica da influência positiva e negativa dos fatores significativos de estudo para os parâmetros de avaliação adotados (pH e viscosidade) através do diagrama dos seus efeitos (disposição e tamanho dos seus histogramas).



Notação: [] = concentração mássica, p/p; L e Q = modelos de ajuste linear e quadrático.

Figura 4: Diagrama dos efeitos a partir dos dados significativos obtidos da análise estatística, cujos resultados se referem a: a) pH; b) viscosidade.

Fonte: Autor (2020).

Verifica-se na Figura 4, através das alturas dos histogramas, que o carbopol é fator mais significativo de estudo para os parâmetros de avaliação e o modelo matemático linear (L) de ajuste dos dados apresenta melhores resultados, mais significativos em relação ao quadrático(Q). Posteriormente, a glicerina é mais significativa do que a trietanolamina para o pH. A trietanolamina é segundo fator mais significativo para a viscosidade. Observa-se que a glicerina no modelo quadrático é o único componente que tem grande influência negativa para o pH (Figura 4a), porém esse comportamento está equivocado, pois os resultados dos produtos obtidos dos ensaios experimentais demonstraram que um aumento de glicerina resulta em um aumento do pH. A influência dos fatores de estudo para a viscosidade (Figura 4b) demonstra que apenas a interação entre a trietanolamina e glicerina causa um decréscimo de viscosidade. Já os demais fatores contribuem bastante para o seu aumento.

Para avaliar a região de ótimo de formulação do álcool gel foram utilizados os resultados das curvas de nível do tratamento estatístico fornecido pelo DCCR aplicado. A Figura 5 apresenta as curvas de nível para os parâmetros de pH e viscosidade.

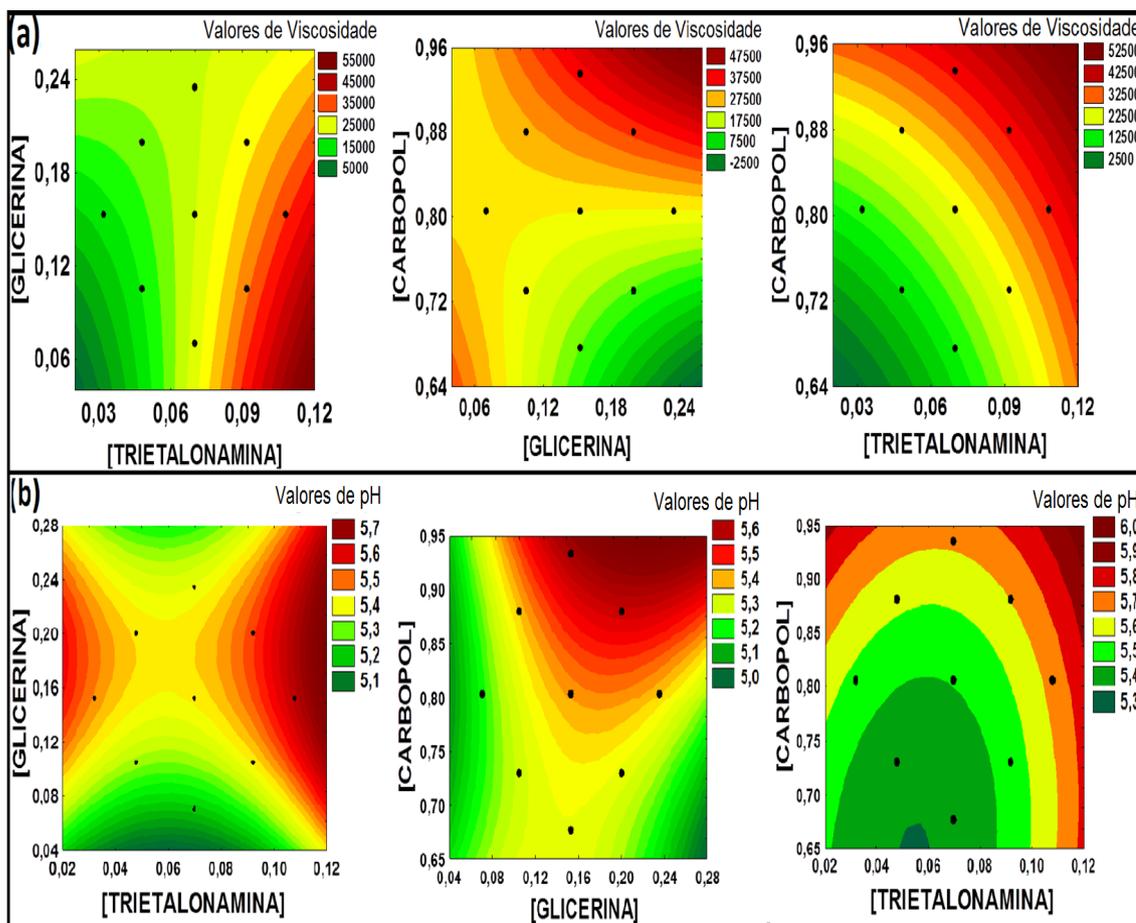


Figura 5: Curvas de níveis do DCCR aplicado das relações entre as concentrações mássicas (p/p) dos componentes (variáveis de estudo) para: **a)** a viscosidade; **b)** o pH.

Fonte: Autor (2020).

Associando as informações das curvas de níveis das proporções mássicas dos componentes estudados para se obter valores desejáveis de viscosidade (faixa de 18.000 a 25.000 cP) e de pH (próximo a 7,0), apresentadas na Figura 5, verifica-se a seguinte região ótima de operação para a formulação do álcool gel: 0,8% em peso de carbopol, 0,07% em peso de trietanolamina e de 0,16% em peso de glicerina. Essa condição resulta em um produto com pH de 5,5 e viscosidade de 20.000 cP, segundo os resultados obtidos dos ensaios experimentais do DCCR. Entretanto, deve-se aumentar o pH do produto para o seu uso em contato com a pele, nesse caso é necessário a utilização de um extrato alcoólico com o pH mais próximo a neutralidade, pois o aumento na proporção de carbopol, que é a componente que tem maior influência sobre o mesmo, implica também em um aumento relativo na viscosidade, o que é indesejável para o produto. Todavia, quando esse produto é comparado com os produtos similares comerciais em relação aos resultados de pH e viscosidade se verifica que ele se encontra de acordo com a legislação nacional vigente de comercialização (RDC N° 46, de 20 de fevereiro de 2002 da ANVISA) e com características

próximas aos mesmos conforme os resultados apresentados na Tabela 6:

Álcool gel	pH	Viscosidade (cP)
Produto obtido (76 °GL ou 71 °INPM)	5,5	20.000
Marca comercial 1 (70 °INPM)	6,9	28.100
Marca comercial 2 (70 °INPM)	7,5	26.625
Marca comercial 3 (70 °INPM)	7,4	26.875

Tabela 6: Resultados das determinações de pH e viscosidade do produto obtido em uma condição ótima de formulação (0,8% carbopol/0,07% trietanolamina/0,16% glicerina, em peso) e de álcoois em gel comerciais adquiridos no comércio local de João Pessoa/PB.

Fonte: Autor (2020).

Verifica-se na Tabela 6 que os produtos comerciais apresentam viscosidade superior ao produto obtido. Presume-se que esse fato é devido a presença de um ou mais hidratantes e outros agentes (conservantes, estabilizantes) na formulação desses produtos além da composição básica de álcool/carbômero/amina/umectante.

4 | CONCLUSÕES

Os descartes alcoólicos cedidos pelos órgãos da Receita Federal brasileira apresentam características físicas e químicas satisfatórias para a produção de extratos alcoólicos concentrados através de adequada metodologia de destilação. O rendimento operacional médio da destilação das misturas alcoólicas para a produção de extratos alcoólicos concentrados é expressivo e igual a $60,2 \pm 0,8$ %.

As faixas mássicas dos principais componentes de formulação de um álcool gel com pH e viscosidade desejáveis, produzido com o extrato alcoólico concentrado (76 °GL, pH = 5,7) obtido dos descartes alcoólicos cedidos pela Receita Federal brasileira, são de 0,7 a 0,85% em peso de carbopol, 0,07 a 0,09% em peso de trietanolamina, 0,16 a 0,18% em peso de glicerina. Essa formulação resulta em um produto com pH na faixa de 5,3 a 5,5 e viscosidade de 14.000 a 24.000 cP. Essa faixa de pH do álcool gel restringe o seu uso para a limpeza de materiais e superfícies, evitando-se seu contato com a pele.

REFERÊNCIAS

- ANDRZEJEWSKI, T.; VIEIRA, E. **Uma análise das técnicas de destruição de resíduos de mercadoria**. 25 p., 2015. Monografia (Especialização em Gestão de Projetos)-Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande/MS, 2015.
- ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). **Resolução RDC N° 46, DE 20 DE FEVEREIRO DE 2002**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Resolução NBR 5992 - Informação e documentação: Referências**. Rio de Janeiro, 24 p., 2008.
- DE OLIVEIRA L.C., DE SOUZA S.O., MAMEDE M.E.O. Avaliação das características físico-químicas e colorimétricas de vinhos finos de duas principais regiões vinícolas do Brasil. *Rev. Inst. Adolfo Lutz*. São Paulo, v.70(2), p. 158-67, 2011.

RODRIGUES, M.S.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**, Casa do Pão Editora, Campinas-SP, 2005. 326 p.

RUSSELL, I.; BAMFORTH, C.; STEWART, G. **Whisky: Technology, Production and Marketing**, Academic Press Elsevier, 352 p., 2003.

WEBB, P.A. **Volume and density determinations for particle technologists**. Micromeritics Instrument Corporation, 16 p., 2001.

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 do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

JOÃO DALLAMUTA: Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Doutorando pelo INPE na área de pesquisa de gestão de projetos e produtos espaciais. Trabalha com os temas: Inteligência de mercado, Engenharia da Qualidade, Planejamento Estratégico, Empreendedorismo.

VIVIANE TELEGINSKI MAZUR: Tecnóloga em Processos de Fabricação Mecânica (2010 - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Ponta Grossa), Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais (2012 - Universidade Estadual de Ponta Grossa) e Doutora em Ciências e Tecnologias Espaciais (2016 - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/DCTA/ IEAv). Possui experiência nas áreas: tratamento de refusão superficial a laser, soldagem a laser, texturização a laser, deposição de revestimentos a laser e a plasma, caracterização de materiais metálicos e cerâmicos, TBC. Atualmente é professora do Magistério Superior e Diretora de Pesquisa e Pós-Graduação na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus Guarapuava.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Alcalinidade 141, 142, 143, 144, 148, 149, 150, 151, 152
Análise dinâmica 95
Análise numérica 103, 104, 114, 116, 118

B

Biodiesel 142, 144, 147, 149, 150, 151, 152, 189

C

Captura de movimento 10, 58, 59
Cogeração 154, 159, 160
Combustão interna 1, 2, 3, 68, 73, 124, 125, 126, 127, 132, 135, 138
Controlador 119, 120, 122, 123
Corantes 176, 179, 213, 220

D

Demanda energética 1, 2, 4, 6, 127
Discretização 78, 79, 80, 81, 93

E

Eficiência energética 40, 42, 44, 45, 46, 48, 50, 55, 124, 154, 158, 159, 160
Eletr deposição 14, 15, 16, 20, 24, 27
Emissões de gases 127, 154
Energias renováveis 14, 26
Ensaio 162, 164, 165, 170, 172, 173, 195, 196, 208, 210, 269
Equação Diferenciais 95
Extensão da Vida Útil 28

F

Figuras planas 78, 80, 93
Fluido magneto reológico 103, 104, 105, 107, 109, 110, 113
fluidos 37, 54, 103, 107, 108, 135, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 152, 153
Fluidos 104, 108, 142, 153
Fluido Visco Plástico 103
Fotocatálise 176, 179, 186, 212, 213, 219

G

Gases de exaustão 124, 127, 133, 135, 136
Gases de Exaustão 134
Gerador termoelétrico 124, 128
Grandezas monitoradas 28, 34, 35

I

IEC 61850 28, 30, 37, 38

Impacto 3

IMU 58, 59, 60

Infraestrutura 1, 2, 3, 7, 11, 12, 42, 43, 44, 45, 48, 52, 59

Injeção eletrônica 67, 68, 69, 71, 76, 77

M

Matemática intervalar 67, 68, 70, 72, 73, 74, 75, 76

Materiais compósitos 162, 163, 170, 171, 175

Mecânica 9, 78, 94, 101, 103, 118, 124, 141, 175, 279

Método de Newmark 95, 97

Motor 2, 3, 36, 37, 58, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 98, 124, 125, 126, 127, 129, 132, 133, 135, 138

N

Não linearidades 95, 100

O

Óxido de cobre 14, 20, 25

Óxido de titânio 14, 20

P

Paralisia cerebral 10, 58, 59

Perfuração 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153

Perfuração 11, 141, 153

Peso 162, 163, 164, 165, 166, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 180, 266, 276, 277

PID 119, 120, 122, 123

Pistão MR 103, 110

Potência 8, 10, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 46, 50, 51, 124, 126, 127, 131, 133, 136, 137, 138, 205

Precisão 20, 46, 65, 67, 71, 73, 74

Propriedades geométricas 78, 79, 80, 81, 84, 93, 134

S

Semicondutores 14, 15, 26, 124, 129, 134, 135, 136, 176, 179, 184, 187, 213

Sensor inercial 58

Suspensão coloidal 103

Suspensão Coloidal 103

T

Transformadores 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39

V

Veículo Elétrico 2, 3, 12, 13

Vibração 35, 108, 109, 119, 120, 123

 **Atena**
Editora
2 0 2 0