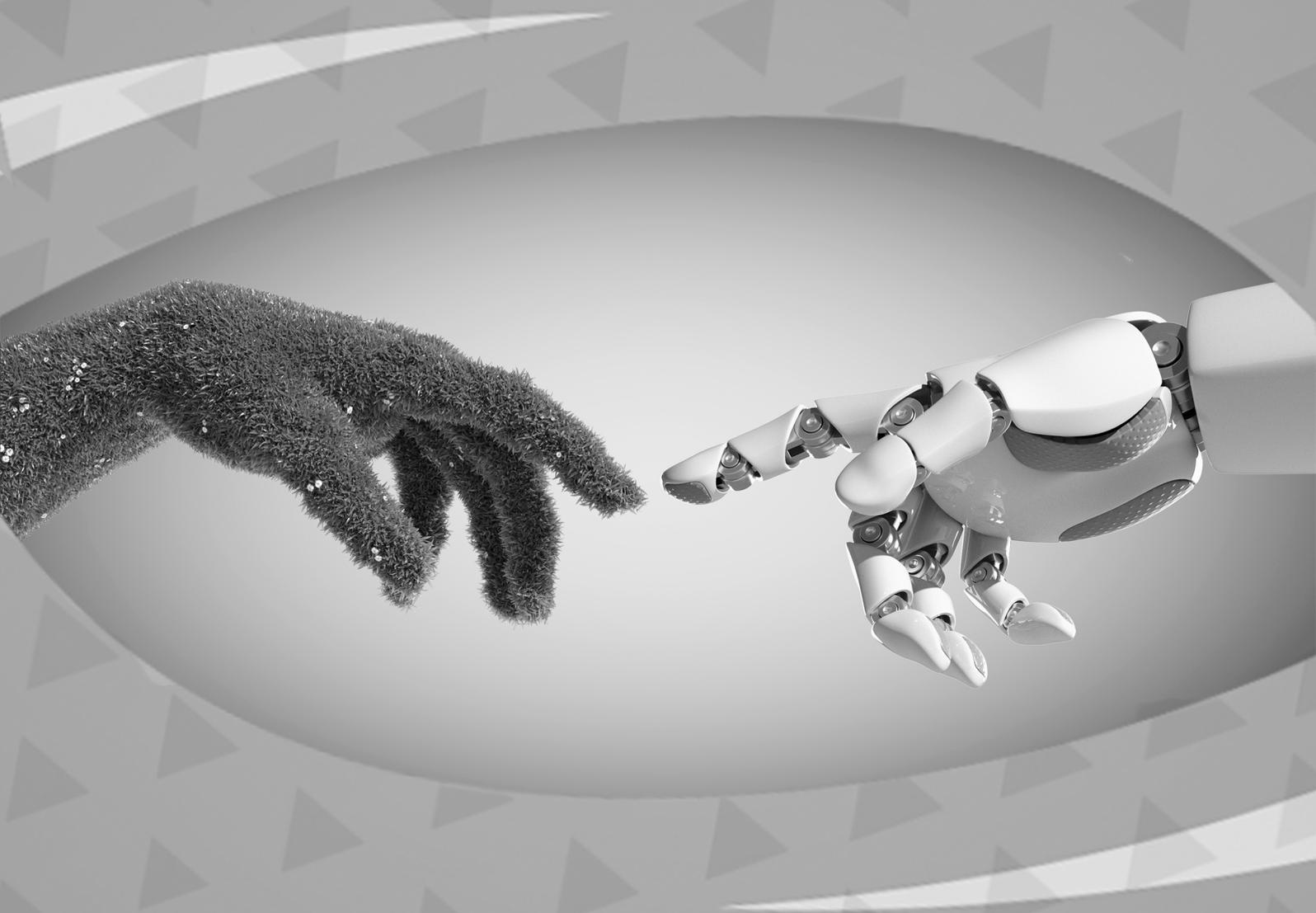


**Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio  
(Organizadores)**



# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5**

**Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio  
(Organizadores)**



# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5**

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 Internazionele 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrezza Miguel da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof<sup>a</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
Prof<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof<sup>a</sup> 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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	<p>As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 5 [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Leonardo Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.</p> <p>Formato: PDF            Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader            Modo de acesso: World Wide Web            Inclui bibliografia            ISBN 978-65-5706-087-2            DOI 10.22533/at.ed.872200806</p> <p>1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Tullio, Leonardo.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A obra “As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 5” contempla vinte e um capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas e inovações aplicadas nas mais diversas áreas da engenharia.

Pesquisas na área de engenharia elétrica trazem informações sobre transmissão, geração de energia, bem como, pesquisas visando a sustentabilidade e eficiência energética.

São apresentados trabalhos referentes a robótica, demonstrando estudos sobre ferramentas que visam a construção de equipamentos que auxiliam as pessoas a executar determinadas atividades de forma autônoma.

O estudo sobre materiais e seu comportamento auxiliam na compreensão sobre suas propriedades, o que permite a utilização em diversas áreas.

Estudos sobre urbanização, influência do vento na estrutura de edificações, conforto térmico e saneamento também são objetos desta obra.

Esperamos que esta obra promova ao leitor o desejo de desenvolver ainda mais pesquisas, auxiliando na constante transformação tecnológica que a sociedade vem sofrendo, visando a melhoria da qualidade do meio ambiente e economia. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio  
Leonardo Tullio

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
A EXPERIENCIA DA CHESF NA REPOTENCIAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS DA HIDRELÉTRICA PAULO AFONSO II	
Emmanuel Moura Reis Santos Edson Guedes da Costa Luiz Antônio Magnata	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008061</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
AVALIAÇÃO DO MODELO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ADOTADO NO BRASIL DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE APRIMORAMENTO	
João Carlos de Oliveira Mello Evelina Maria de Almeida Neves Dalton Oliveira Camponês do Brasil Eduardo Nery Thais Prandini	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008062</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>23</b>
MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO EM INSTALAÇÕES DE CORRENTE CONTÍNUA – DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MEDIÇÃO PARA ATENDIMENTO AOS LIMITES DEFINIDOS PELA ANEEL	
Athanasio Mpalantinos Neto Carlos Ruy Nunez Barbosa Luís Adriano de Melo Cabral Domingues Paulo Roberto Gonçalves de Oliveira Rafael Monteiro da Cruz Silva Júlio César A. de Aguiar	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008063</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>35</b>
AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO NO VIÉS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DOS PLANOS ENERGÉTICOS REFERENCIAIS DO SETOR ELÉTRICO DAS NAÇÕES	
Flavio Minoru Maruyama Andre Luiz Veiga Gimenes Luiz Claudio Ribeiro Galvão Miguel Edgar Morales Udaeta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008064</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
CONSTRUÇÃO DE TURBINA DE TESLA E VALIDAÇÃO DE MODELO TEÓRICO	
Lucas Vinicius Capistrano de Souza Leonardo Haerter dos Santos Jader Flores Schmidt Moises da Silva Pereira Agnaldo Rosso	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8722008065</b>	

**CAPÍTULO 6 ..... 64**

DIMINUIÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO COM A SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS POR SUPERCAPACITORES

Lourival Lippmann Junior  
Rafael Wagner  
Carlos Ademar Purim  
Francisco José Rocha de Santana

**DOI 10.22533/at.ed.8722008066**

**CAPÍTULO 7 ..... 75**

O FUTURO DAS TÉRMICAS NA MATRIZ BRASILEIRA – PRÁTICAS E FUNDAMENTOS

João Carlos de Oliveira Mello  
Thaís Melega Prandini  
Marcelo Ajzen  
Xisto Viera Filho  
Edmundo Pochman da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.8722008067**

**CAPÍTULO 8 ..... 88**

UMA VISÃO DE MERCADO NA GESTÃO DE RISCOS DE CONSUMIDORES ELETROINTENSIVOS - MELHORES PRÁTICAS

João Carlos de Oliveira Mello  
Camila Câmara Lourenço  
Rodrigo Viana  
Rogério Catarinacho  
Nicolas Jardin Jr

**DOI 10.22533/at.ed.8722008068**

**CAPÍTULO 9 ..... 101**

CONTROLE SIMPLES E ROBUSTO PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS ATRAVÉS DO MOVEIT

Kaike Wesley Reis  
Rebeca Tourinho Lima  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.8722008069**

**CAPÍTULO 10 ..... 109**

DOOGIE MOUSE: UMA PLATAFORMA OPEN SOURCE PARA APLICAÇÃO DE ALGORITMOS INICIAIS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ROBÓTICA MÓVEL

Caio Alves Amaral  
Mateus dos Santos Meneses  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.87220080610**

**CAPÍTULO 11 ..... 118**

SEISMIC IMAGING USING FPGA APPLIED FOR REVERSE TIME MIGRATION

Joaquim Ranyere Santana de Oliveira  
João Carlos Nunes Bittencourt  
Deusdete Miranda Matos Junior  
Anderson Amorim do Nascimento  
Laue Rami Souza Costa de Jesus  
Georgina Gonzalez Rojas  
Rodrigo Carvalho Tutu  
Wagner Luiz Alves de Oliveira  
Silvano Moreira Junior

**DOI 10.22533/at.ed.87220080611**

**CAPÍTULO 12 ..... 127**

LOCALIZAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS EM AMBIENTE INTERNOS USANDO MARCOS FIDUCIAIS

Gabriel da Silva Santos  
Etevaldo Andrade Cardoso Neto  
Marco Antonio dos Reis

**DOI 10.22533/at.ed.87220080612**

**CAPÍTULO 13 ..... 136**

AValiação DE NANOPARTÍCULAS DE AMIDO COMO ADITIVO A LUBRIFICANTES

Matheus Gonçalves Leão de Oliveira  
Pollyana Grazielle Luz da Rocha  
Paulo Vitor França Lemos  
Denilson de Jesus Assis  
Adelson Ribeiro de Almeida Júnior  
Jania Betânia Alves da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.87220080613**

**CAPÍTULO 14 ..... 146**

UTILIZAÇÃO DE COATINGS DE QUITOSANA NA CONSERVAÇÃO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum*)

Luciano Pighinelli  
Anderson Rockenbach  
Pamela Persson  
Renata Cardoso Pospichil

**DOI 10.22533/at.ed.87220080614**

**CAPÍTULO 15 ..... 156**

ANÁLISE METALOGRAFICA DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO AISI 1050 USADO NA HASTE DE DIREÇÃO DE UMA MÁQUINA AGRÍCOLA DA SÉRIE 8R

Vagner dos Anjos Costa  
Fábio Santos de Oliveira  
Sílvio Leonardo Valença  
Gabriela Oliveira Valença  
Paulo Henrique de Souza Viana  
João Vítor Chaves Cordeiro

**DOI 10.22533/at.ed.87220080615**

<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>165</b>
EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE GALVANOPLASTIA NA CIDADE DE JUAZEIRO DO NORTE-CE	
<a href="#">Petronio Silva de Oliveira</a> <a href="#">José Laécio de Moraes</a> <a href="#">Francisco Evanildo Simão da Silva</a> <a href="#">Francisco Thiciano Rodrigues de Assis</a> <a href="#">Edyeleen Mascarenhas de Lima</a> <a href="#">Anderson Lima dos Santos</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080616</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>176</b>
ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO LUCAIA, SALVADOR-BA	
<a href="#">José Orlando Oliveira Moura Júnior</a> <a href="#">Nicole Caroline B. Santos Xavier</a> <a href="#">Thayna Santana de Lima</a> <a href="#">Alexandre Boleira Lopo</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080617</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>182</b>
QUALIDADES DO URBANO	
<a href="#">Franklin Soldati</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080618</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>199</b>
ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE CONFORTO TÉRMICO E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UNIDADE DE SAÚDE	
<a href="#">Gabriela Regina Rosa Galiassi</a> <a href="#">Ana Clara Alves Justi</a> <a href="#">Gabriel Henrique Justi</a> <a href="#">Maribel Valverde Ramirez</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080619</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>215</b>
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS	
<a href="#">Neilton dos Santos Seguins Costa</a> <a href="#">Vilson Souza Pereira</a> <a href="#">Dalmo Inácio Galdez Costa</a> <a href="#">Paulo César de Oliveira Queiroz</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080620</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>226</b>
TRANSPORTE DE CROMO (CR <sup>+3</sup> ) E NÍQUEL (NI <sup>+2</sup> ) EM CAMADA DE SOLO COMPACTADA	
<a href="#">Leonardo Ramos da Silveira</a> <a href="#">Newton Moreira de Souza</a> <a href="#">André Luis Brasil Cavalcante</a>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.87220080621</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>241</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>242</b>

## A EXPERIENCIA DA CHESF NA REPOTENCIAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS DA HIDRELÉTRICA PAULO AFONSO II

Data de aceite: 02/06/2020

**Emmanuel Moura Reis Santos**  
CHESF/UFCG BRASIL

**Edson Guedes da Costa**  
UFCG BRASIL

**Luiz Antônio Magnata**  
UFPE BRASIL

**RESUMO:** *Arepotenciação é uma prática que visa estender a vida útil de hidrogeradores, ao mesmo tempo, que procura resgatar a confiabilidade da usina, com maior potência. O presente trabalho foi desenvolvido a partir do estudo de caso, na qual será apresentada a metodologia aplicada na repotenciação das unidades geradoras 01 e 02 da Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso II, onde componentes como: bobinas polares, núcleo do estator e enrolamento estatórico, que possuíam isolamento à base de resina asfáltica, de classe B e com vida útil superada, foram substituídos por materiais com nova tecnologia, possibilitando condições mais severas de operação, aumentando a confiabilidade e elevando a sua capacidade de geração.*

Foi realizado um estudo dos processos que o fabricante realizou em fábrica e na

montagem dos hidrogeradores, abordando as melhorias do novo projeto e relatando os benefícios de cada processo.

A repotenciação foi a solução ideal, pois proporcionou maior confiabilidade, aumento da disponibilidade das unidades geradoras e o aumento da produção de energia elétrica com melhor eficiência.

**PALAVRAS-CHAVE:** Repotenciação, Hidrelétrica Paulo Afonso II, Gerador.

### 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, em relação a geração de energia elétrica no Brasil, todos os cálculos apontam para a necessidade de investimentos vultosos dirigidos ao atendimento do crescimento da demanda no país. A CHESF, por necessidade imperiosa devido as várias ocorrências e objetivando manter a disponibilidade que sistema elétrico requer, decidiu repotenciar as unidades geradoras de PAII, mudando a classe de isolamento B para a classe F de acordo com o estado atual da arte. O incremento de potência para cada gerador foi de 13,5 MVA.

### 2 | MOTIVAÇÃO

As freqüentes ocorrências, o fim do

sobressalente de barras estatóricas aliado com o tempo de operação das unidades geradoras Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso II (início de operação 1961) foram os principais pontos que levaram a CHESF a modernizar tais unidades.

## 3 | REPOTENCIAÇÃO

### 3.1 Gerador

As unidades 01 e 02 da Usina Hidrelétrica de Paulo Afonso II apresentavam as seguintes características técnicas :

✓ Fabricante :	HITACHI	ALSTOM
✓ Potencia Nominal continua :	69,52 MVA	83 MVA
✓ Fator de Potência Nominal	0,95	0,95
✓ Tensão Nominal :	13,8 kV	13,8 kV
✓ Frequência Nominal :	60 Hz	60 Hz
✓ Número de pólos :	36	36
✓ Velocidade de rotação nominal :	200 rpm	200 rpm
✓ Corrente nominal :	2910 A	3473 A
✓ Regime de operação :	Contínuo	Contínuo
✓ Numero de fase :	3	3
✓ Numero de ranhuras :	378	378
✓ Tipo de enrolamento :	Imbricado	Imbricado
✓ Classe de isolamento do estator:	B	F

### 3.2 Enrolamento estatórico

Os geradores 01G1 e 01G2 apresentaram um histórico de ocorrências, envolvendo curtos-circuitos fase-terra no enrolamento do estator. No caso do gerador 01G1 foram registradas sete ocorrências entre 11/01/1974 e 15/07/2006, sendo que, nesta última ocorrência, houve curto-circuito fase-terra. No caso do gerador 01G2 registraram-se três curtos-circuitos fase-terra no período entre 29/12/1994 e 15/07/2005. Os resultados das inspeções nesses geradores mostraram que o enrolamento estatórico apresentava elevado nível de descargas parciais, atribuído à ultrapassada tecnologia de fabricação da isolação.

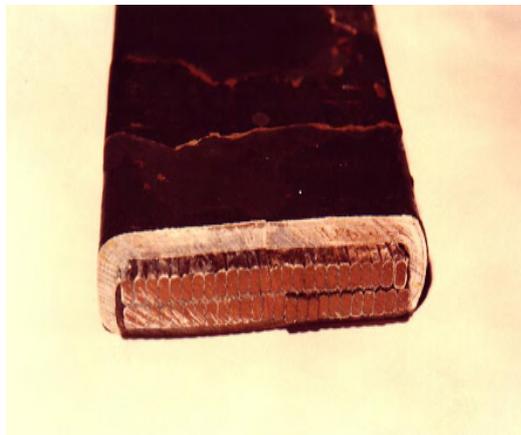


Fig. 1 – Folga entre isolamento e o cobre da barra

A repotenciação do enrolamento estatórico foi determinada pela melhor qualidade da isolação elevando a classe de isolamento térmica de B para F.

A isolação térmica classe F usada nas barras estatórica dos geradores 01 e 02 de Paulo Afonso II é do tipo Micadur. O sistema de isolação Micadur utiliza fitas de tecido de vidro com mica e resina sintética à base de epóxi e poliéster, impregnada a vácuo, a qual apresenta uma rigidez dielétrica de 3 kV/mm, baixas perdas dielétricas e um melhor condutibilidade térmica comparada com isolação térmica classe B.

O enrolamento estatórico é constituído por duas barras, superior e inferior, as quais são formadas por vários condutores, isolados entre si, e transpostos usando tecnologia **ROEBEL**.

O aumento da potência não deve ser creditado apenas ao emprego de materias tecnologicamente superiores, porque melhorias aplicadas ao sistema de ventilação proporcionaram esse adicional e uma redução da ordem de 19% na seção trasversal das barras do enrolamento do estator.

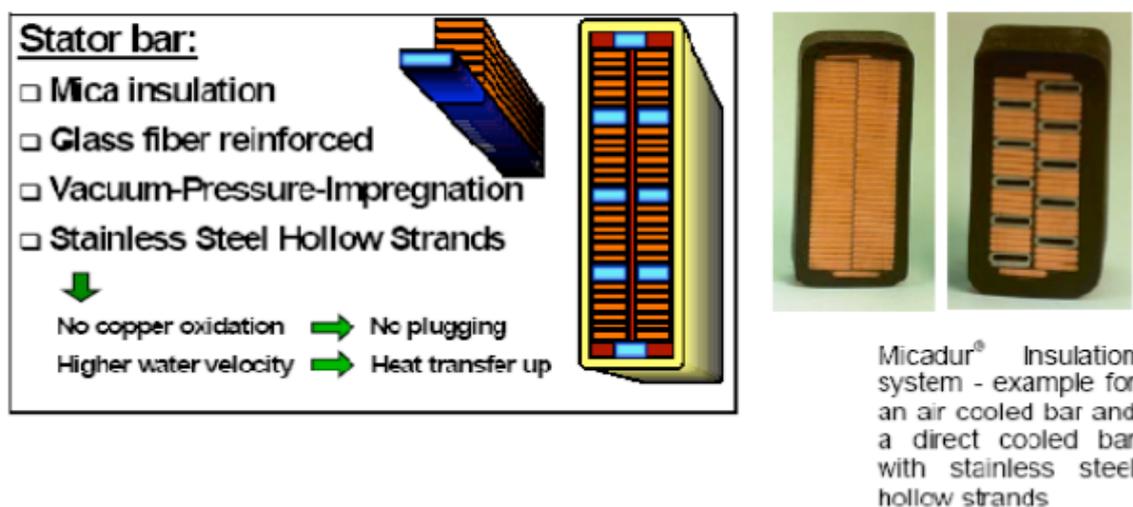


Fig. 2 – Sistema de Isolação Micadur

O projeto de cunhagem das ranhuras do núcleo utilizou cunhas planas, abaixo das quais se encontram calços de enchimento e mola (ripple spring). As barras foram pressionadas evitando movimentos indevidos e o afrouxamento das cunhas, mitigando o risco de ocorrer movimento radial das barras devido as forças de repulsão e atração que ocorrem quando a corrente circula nas barras. Pois quando as barras são de fases diferentes, em alguns ciclos ocorrem que as correntes estão em direção opostas, e se repelem. Em outros, se atraem por estarem na mesma direção.

Estas forças causariam vibrações, e conseqüentemente, poderiam causar desgaste do sistema de proteção anticorona da barra na região interna à ranhura. Este desgaste pode causar descargas parciais, que prejudica a isolamento, reduzindo significativamente a vida remanescente das barras. O sistema de fixação está ilustrado a seguir:

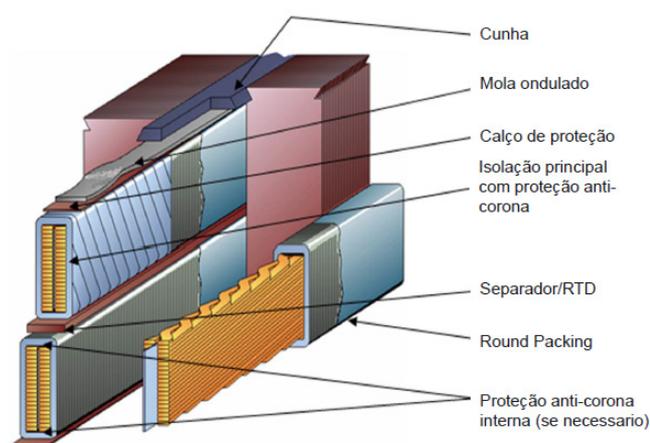


Fig. 3 – Sistema de embutimento das barras do estator

### 3.3 Núcleo do estator

O antigo núcleo da unidade geradora possuía um sistema de aperto ineficiente. Os tirantes eram soldados às prateleiras da carcaça e não funcionavam no sentido exato da palavra, pois o ideal é que os tirantes não tenham vínculo a carcaça, sofrendo alongamento quando tensionados e funcionando como uma mola para aperto do núcleo. Na concepção anterior, o aperto só era dado pela pressão das placas de aperto, dificultando a compactação das chapas do núcleo. Existiam consideráveis ondulações e folgas nas lâminas do núcleo, como podemos observar na Figura 4. A causa deste fenômeno era a impossibilidade da expansão radial da carcaça. O aquecimento do núcleo provocava uma dilatação do estator, pois a carcaça não era rígida o suficiente de forma que impedisse esta expansão, o aumento do diâmetro do núcleo provocado pelo aquecimento se transformou em ondulações e folgas.



(a)

(b)

Fig. 4 – (a) Núcleo estático antigo. (b) Núcleo estático novo.

O núcleo substituído foi fabricado com chapa de silício, de grão não orientados, laminado a frio, com revestimento em verniz isolado eletricamente em ambos os lados, com perda máxima de 1,35 W/Kg a 1 T, 60Hz. O novo núcleo estático considerou os raios externo e interno e dimensões de ranhura para acomodação do novo enrolamento, além de melhorar consideravelmente as condições operacionais do gerador.

Para evitar a flambagem do núcleo foram previstas algumas medidas para prevenir o surgimento deste fenômeno, como a mudança dos dutos de ventilação, melhorando a área de contato entre o ar de refrigeração e o núcleo estático, e a otimização do sistema de prensagem das chapas do núcleo.

No processo de montagem do novo núcleo, o empilhamento das chapas foi de forma contínua, garantindo uma maior rigidez e eficácia na montagem do conjunto de chapas, evitando problemas de ondulação. O máximo cuidado foi tomado para prevenir a formação de curtos-circuitos entre lâminas, que poderiam gerar sobreaquecimentos localizados. Durante a montagem na obra, as lâminas foram posicionadas e guiadas pelas cunhas “rabo de andorinha” instalados na carcaça. Estas são previamente posicionadas precisamente sobre o diâmetro interno da carcaça, garantindo a verticalidade do núcleo.

A prensagem do núcleo foi garantida pelo aperto das molas-prato, das placas de prensagem e dos dedos de pressão, através dos tirantes de aperto, que atravessam todo o núcleo e foram projetados de modo a manter o núcleo em estado compacto durante o funcionamento da máquina.

Os dedos de pressão, de material anti-magnético, transferem a pressão de aperto das placas de pressão para os dentes dos pacotes de chapa siliciosa. Assim se assegura que não haja vibrações nos dentes. A Figura 5 apresenta uma ilustração do sistema de prensagem mencionado.

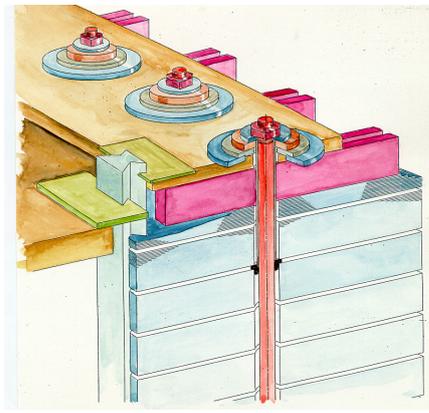


Fig. 5 – Sistema de prensagem do núcleo do estator.

O sistema empregado possibilita independência no sentido axial e, portanto permitirá novos reapertos caso os pacotes de chapas se afrouxem durante a operação da máquina. Este sistema distribui melhor a pressão, resultando um baixo custo de manutenção.

### 3.4 Carcaça

Na antiga carcaça, os tirantes eram soldados as prateleiras, não funcionando adequadamente. As placas de pressão não conseguiam transmitir a pressão adequada em toda a superfície do núcleo e o reaperto pelo lado inferior do gerador não era possível, pois as porcas eram travadas por meio de soldas nas faces da carcaça. O problema de fixação se agravava com a ventilação ineficiente. O aquecimento do núcleo provocava uma força radial que tendia a expandir, e como o sistema de fixação não funcionava adequadamente e o núcleo estava frouxo, surgiram inevitavelmente ondulações nas lâminas.

A etapa de adequação da carcaça para acoplamento do novo núcleo foi executada com certo nível de dificuldade, principalmente por causa de problemas de nivelamento de alguns itens fabricados diferentemente do projeto original. Esta etapa foi, basicamente, composta da liberação dos pinos de fixação da carcaça com o piso de concreto e seu nivelamento, retirada das chapas de fixação dos tirantes originais para instalação de novos, centragem da carcaça e fixação das novas chapas de suporte das cunhas “rabo de andorinha”, para fixação dos pacotes de chapas do novo núcleo. Como pode-se observar na Figura 6.



(a)

(b)

Fig. 6 – (a) Adequação da carcaça do estator. (b) Cunha rabo de andorinha.

Realizada a adequação e nivelamento de novas placas de pressão e seus respectivos dedos de aperto. Foram também efetuadas aberturas de novas janelas (aberturas) de ventilação na carcaça, melhorando o resfriamento do núcleo e das cabeças de bobinas do novo projeto do enrolamento.

Ao observar a Figura 7, é possível verificar as diferenças entre os sistemas de prensagem e o acoplamento à carcaça.

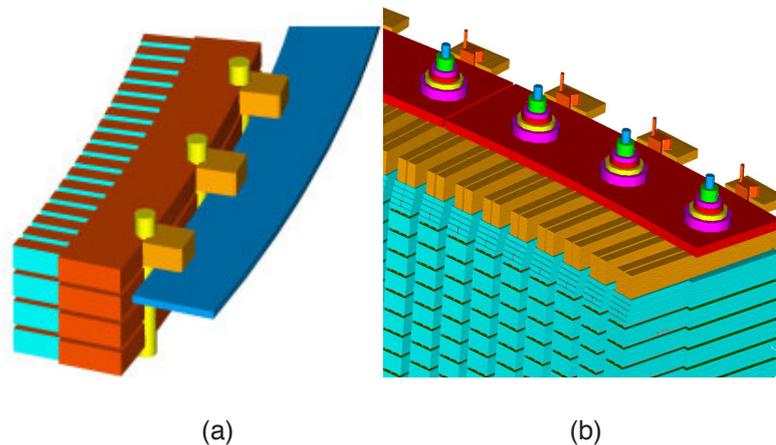


Fig. 7 – (a) Sistema de prensagem do núcleo antigo. (b) Sistema de prensagem do núcleo novo.

Antes do empilhamento das novas chapas, foram executadas medições visando à centralização da carcaça e a verificação da posição correta das barras “rabo de andorinha” de apoio do núcleo, isto é, a verificação de espaçamento nos sentidos radial, circunferencial e vertical. Onde foram verificados a centralização e nivelamento dos eixos da turbina e corrigidos. No novo sistema de prensagem com tirantes pré-tensionados passantes pelo núcleo, a pressão é exercida apenas no núcleo, e assim, sem reação sobre a carcaça. Como pode-se observar na Figura 8.

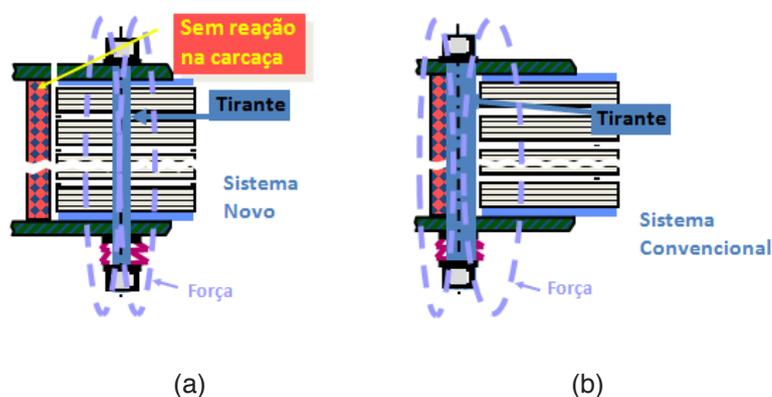


Fig. 8 – (a) Pressão exercida no núcleo antigo. (b) Pressão exercida no núcleo novo.

### 3.5 Pólos do rotor

O antigo núcleo estático da unidade geradora 01G1 era fortemente agredido nas suas extremidades pelo fluxo de borda (fluxo na direção axial), em função do comprimento dos pólos do rotor possuir uma dimensão vertical maior do que a altura do núcleo do estator em 110 mm.

Nestas circunstâncias, um valor elevado de perdas elétricas era gerado nos pacotes de chapas extremos do núcleo, as quais elevavam demasiadamente a temperatura de trabalho dos mesmos.

Além da elevação da temperatura de trabalho, que atingia mais de 121 °C de acordo com as medições efetuadas, o fluxo axial também propiciava o aparecimento de elevadas forças entre as lâminas componentes destes pacotes, as quais variavam ciclicamente, gerando fortes vibrações.

Estes valores de temperatura, associados à elevada vibração, provocaram um desgaste prematuro das lâminas, deteriorando-as, causando sérios riscos das mesmas fragmentarem e atingirem as barras estáticas.

Considerando as recomendações da Proposta de Normatização IEEE Std. 1147-1991, foi feito o diagnóstico das bobinas polares que possui isolação entre espira classe B.

Quando da especificação dos serviços de repotenciação, muito se discutiu à respeito da necessidade ou não, de se alterar a classe de isolamento do rotor dos dois geradores de B para F. Após ensaios de aquecimento e estudo sobre o incremento da temperatura do rotor, concluiu-se pela manutenção da classe de isolamento existente. No ensaio de comissionamento final pode-se constatar efetivamente que a classe B atendia, com folga, as elevações de temperatura do novo regime de operação da máquina.

## 4 | RESULTADOS OBTIDOS

Com o passar dos anos, a confiabilidade e disponibilidade das unidades geradoras da Usina de Paulo Afonso II estava diminuindo, devido ao envelhecimento do isolamento das bobinas estáticas e das bobinas polares, e a deformação e afrouxamento do núcleo do estator. Aumentando os custos de manutenção e os índices de falhas graves com possibilidade de perda do equipamento.

Foi necessário realizar uma repotenciação nas unidades geradoras, onde os enrolamentos estáticos antigos à base de mica asfáltica, com classe de isolação B, foram substituídos por fitas de mica reforçadas com fibra de vidro e aglutinadas com resina sintética à base de epóxi e poliéster, de classe F. O sistema de isolação, assim constituído, apresenta rigidez dielétrica de 3 kV/mm, baixas perdas dielétricas e o dobro do coeficiente de condutibilidade térmica em relação aos antigos materiais asfálticos que eram utilizados. E com uma camada de espessura de isolamento mais fina que a anterior, possibilitando aumentar a seção de cobre do enrolamento, conseqüentemente a densidade de corrente. Com isso, a capacidade de circulação de corrente foi aumentada, permitindo o aumento da

capacidade de transferência de potência, sem exceder os limites térmicos do enrolamento. Esse foi o ponto mais significativo para o aumento de potência de máquinas.

Com a substituição do material da isolamento, a elevação máxima de temperatura do enrolamento estático, acima da temperatura máxima de 40°C do ar de resfriamento na saída dos radiadores, passou para 90 °C, para toda faixa operativa do gerador.

O sistema empregado para inserção das barras nas ranhuras do núcleo do estator assegurou um embutimento perfeito com folga tendendo a zero, mesmo considerando-se variações dimensionais da barra ou da ranhura. Aumentando o coeficiente de transmissão de calor, minimizando a possibilidade de criação de descargas parciais entre o núcleo do estator e as barras e eliminando a possibilidade de calços saindo da ranhura mesmo após anos de operação.

Porém outros fatores ajudaram na repotenciação, como os processos desenvolvidos no núcleo e nos pólos do rotor.

O novo núcleo estático considerou os raios externo e interno e dimensões de ranhura para acomodação do novo enrolamento, além de melhorar consideravelmente as condições operacionais do gerador.

Com o propósito de transmitir os esforços radiais e tangenciais provenientes da dilatação térmica, o núcleo e as placas de pressão foram ligados por meio de tirantes verticais. Este novo sistema de prensagem mantém o estator dentro de suas condições concêntricas e cilíndricas e, ao mesmo tempo, permite resistir ao torque nominal e a esforços provenientes de falhas elétricas. O núcleo do estator foi fixado à carcaça por meio de cunhas tipo rabo de andorinha e guias da cunha, os quais transmitem os esforços tangenciais e radiais do núcleo à carcaça do estator. O sistema empregado possibilita independência no sentido axial e, portanto, permitirá novos reapertos caso os pacotes de chapas se afrouxem durante a operação da máquina.

As novas bobinas polares receberam novos isolamentos de resina entre si, classe F, substituindo a isolamento antiga de classe B. E as bordas externas das espiras tiveram os perfis estreitados, formando assim uma espécie de aleta de resfriamento, melhorando a dissipação do calor. Com a substituição do material da isolamento, a elevação máxima de temperatura do enrolamento do rotor, acima da temperatura máxima de 40°C do ar de resfriamento na saída dos radiadores, passou para 95 °C.

Após a repotenciação tornou o gerador preparado para potência nominal de 83 MVA (uma repotenciação de 19% em relação à potência original de 69,52 MVA), com classe de isolamento F e elevou seus limites operacionais.

## 5 | CONCLUSÃO

Foram apresentadas as definições e as principais diretrizes da repotenciação das unidades geradoras da Usina de Paulo Afonso II, onde se obteve um ganho de 19% de potência sem interferência na parte civil e com um aumento de vida útil estimada em 40 anos. Dentro deste contexto, foi dada ênfase para os principais equipamentos envolvidos na

repotenciação: núcleo do estator, enrolamento estatórico e pólos do rotor. Com a troca de componentes, foi possível introduzir novas técnicas de engenharia no reprojeto do gerador, com a garantia de se obter a mesma disponibilidade, aumento de sua expectativa de vida e redução dos custos de manutenção. Trazendo-os para uma situação compatível com o atual estado da arte da tecnologia de geração de energia hidrelétrica.

A utilização de isolamentos mais eficientes e das ligas mais leves, dos aços siliciosos de baixas perdas, tornaram proveitosa as substituições das partes vulneráveis do equipamento por componentes portadores de uma suportabilidade e de uma perspectiva de vida bem superiores. Benefícios de segurança e confiabilidade do abastecimento de energia elétrica foram conseguidos através desta repotenciação. Com a vantagem de não oferecer impactos ecológicos e com um tempo de implantação muito inferior ao da construção de uma nova UHE, além das vantagens econômicas.

Assim, pode-se afirmar que a repotenciação de usinas hidrelétricas surge como uma importante alternativa para se obter ganhos de potência, tornando o empreendimento mais atrativo aos investidores e à sociedade.

## REFERÊNCIAS

[1] W. Morgante, T. Kunz, M. Uemori, “Repotenciação da Usina de Elevação de Racoon Mountain (USA)”, XVIII SNPTEE-2005.

[2] F. Sá, “Repotenciação de Hidrogeradores: Uma proposta de metodologia de análise e implantação”, ABB Power Generator.

[3] T. Kunz, “Technical Training on Hydro Generators – Hydro Generator Technology Center”, HGT, Birr, 2001.

[4] M. Uemori, P. Oda, J. Beffa, F. Sá, “Reabilitação, Modernização e Futura Repotenciação das Máquinas de Ilha Solteira”, XVIII SNPTEE-2005.

## AVALIAÇÃO DO MODELO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ADOTADO NO BRASIL DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE APRIMORAMENTO

Data de aceite: 02/06/2020

**João Carlos de Oliveira Mello**

THYMOS ENERGIA

**Evelina Maria de Almeida Neves**

THYMOS ENERGIA

**Dalton Oliveira Camponês do Brasil**

ONS

**Eduardo Nery**

ENERGY CHOICE

**Thais Prandini**

THYMOS ENERGIA

**RESUMO:** Os leilões de transmissão foram implementados no Brasil após a reestruturação do setor de energia nos anos 90. O sucesso do modelo brasileiro de transmissão pode ser avaliado pelo reforço intensivo do Sistema Interligado Nacional a partir de 1999 e pela participação do capital privado nacional e estrangeiro nesses investimentos. No entanto, nos últimos anos, o modelo de transmissão enfrentou vários desafios, especialmente atrasos na implementação dos projetos, principalmente devido às dificuldades no licenciamento socioambiental. Este artigo apresenta uma avaliação do modelo de transmissão considerando os problemas enfrentados no

contexto atual do Setor Elétrico Brasileiro, bem como as perspectivas e oportunidades de aprimoramento como um todo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelo de Expansão da Transmissão de Energia Elétrica, Leilões de Transmissão, *Project Finance*, Investimentos público e privado - Setor Elétrico Brasileiro (SEB)

### 1 | INTRODUÇÃO

A necessidade de maior eficiência na produção e entrega de energia levou à reestruturação dos setores estatais de energia de vários países, com ênfase na concorrência e no investimento privado. O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) vem mudando sua estrutura institucional desde meados dos anos 90, o que incluiu a desagregação das estruturas verticais das empresas nos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia.

A reestruturação ocorreu inicialmente com o estabelecimento de monopólios regulados na transmissão (caracterizada por ativos com nível de tensão acima de 230 kV), na distribuição e na comercialização de energia para consumidores cativos. Uma emenda constitucional autorizou os

investimentos estrangeiros no setor de energia e o governo federal emitiu leis exigindo que todas as concessões para prestação de serviços públicos de transmissão de energia elétrica fossem concedidas por meio de licitação, incluindo os novos projetos de transmissão, e com o pagamento da receita ofertada na licitação.

Os ativos de transmissão existentes antes da reestruturação formaram a **Rede Básica (RB)** inicial do Sistema Interligado Nacional (SIN). Posteriormente, para cada novo leilão de projetos de transmissão é anunciada uma licitação pública para a concessão da prestação de serviços de transmissão de energia elétrica à empresa vencedora, incluindo a construção, operação e manutenção de instalações de rede do SIN.

O licitante vencedor, determinado por meio de um leilão reverso, é aquele que se compromete a prestar os serviços com a menor Receita Anual Permitida (RAP), a partir de um preço teto definido pela ANEEL. A RAP corresponde ao pagamento anual recebido pelas concessionárias de transmissão pela disponibilidade de suas instalações ao SIN, e que não está vinculado à energia transmitida. A RAP é cobrada mensalmente dos usuários do SIN (geradores, distribuidoras e consumidores livres conectados à RB) pelas empresas transmissoras, conforme estabelecido no contrato de concessão, cujo prazo de duração é de 30 anos. As receitas de transmissão são revisadas anualmente pela ANEEL, conforme consta nos contratos, com índices financeiros acordados previamente.

Os contratos de concessão de serviços de transmissão são efetuados entre o Governo Federal (representado pela ANEEL) e as empresas, e estabelecem regras claras relativas à continuidade, segurança, atualização e qualidade dos serviços prestados, além da assistência aos consumidores. Quanto mais eficiente for a empresa em relação à operação e manutenção das instalações de transmissão, mais próxima será sua arrecadação da RAP originalmente estabelecida pela ANEEL.

A RB é operada sob supervisão e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Todos os equipamentos de transmissão estarão sujeitos ao controle de qualidade, de acordo com as normas técnicas e aos procedimentos de rede regulamentados e aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O planejamento setorial é feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sob coordenação do Ministério de Minas e Energia (MME), de forma determinativa para o setor público e indicativa para o setor privado. O Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDE) publicado pelo MME com base nos estudos realizados pela EPE, tem como objetivo apresentar uma visão integrada da expansão da demanda e da oferta de recursos energéticos, definindo as diretrizes e indicações para um horizonte de dez anos, de forma a sinalizar e orientar as decisões dos investidores/ agentes no mercado de energia.

Adicionalmente são elaborados pela EPE o Programa de Expansão da Transmissão (PET) que avalia o horizonte de 6 anos, e o Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP) que avalia o período do 7º ao 10º ano do horizonte decenal. Nestes relatórios são apresentadas todas as obras de expansão do SIN, avaliadas a partir dos estudos de planejamento da EPE, que ainda não foram licitadas ou autorizadas.

O ONS também é responsável pela definição das expansões e reforços das instalações

de transmissão do SIN, por meio do Plano de Expansão e Reforço (PAR), estabelecido para o horizonte de 3 anos. O PAR visa a melhoria da segurança e confiabilidade da rede, a adequação da transmissão para atender às exigências de expansão da demanda, a promoção do livre acesso às redes de transmissão por meio da gestão de novos pedidos de acesso e conexão e o estabelecimento de padrões de desempenho.

A ANEEL administra os procedimentos de licitação dos novos circuitos do SIN a partir dos resultados dos estudos produzidos pela EPE e ONS. A Figura 1 sintetiza o processo institucional do planejamento da expansão da transmissão.

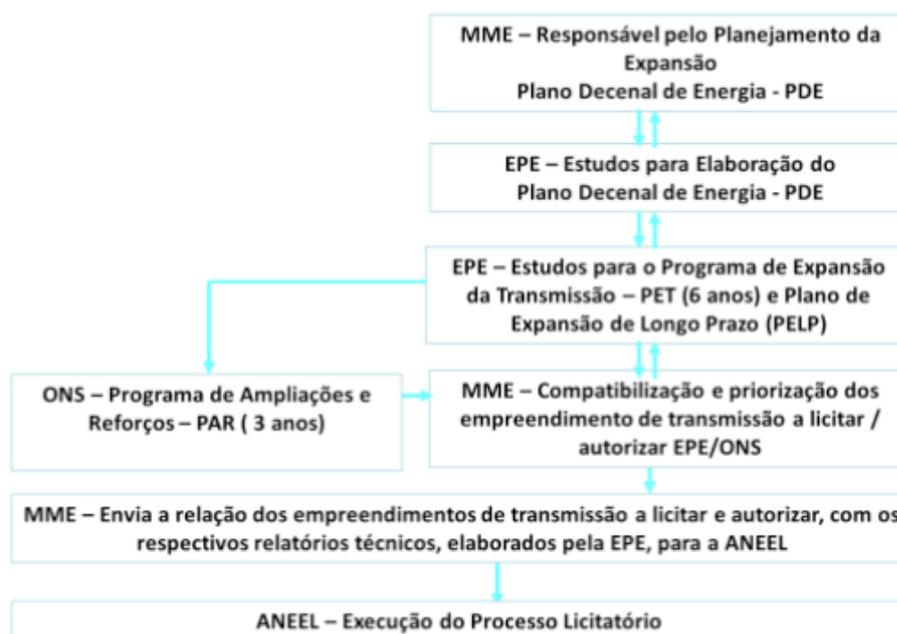


FIGURA 1 – Processo Institucional do Planejamento da Expansão da Transmissão – Fonte: MME/EPE

O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação do modelo de transmissão considerando os sucessos e os problemas enfrentados no contexto atual do Setor Elétrico Brasileiro, estando estruturado da seguinte forma: A seção 1 apresenta esta introdução com a visão geral do processo Institucional do planejamento da expansão da transmissão no Brasil. A sessão 2 apresenta os resultados obtidos pelo modelo de expansão e financiamento da transmissão desde a reestruturação do setor a partir de 1999 até o momento atual. Na sessão 3 é abordado o cálculo das Tarifas de Uso do sistema de transmissão. A sessão 4 apresenta os principais desafios para o Sistema de Transmissão. A sessão 5 apresenta os principais desafios do modelo de transmissão no contexto atual e oportunidades de melhoria que estão em pauta no setor e a sessão 6 apresenta uma breve conclusão.

## 2 | EXPANSÃO E FINANCIAMENTO DOS PROJETOS DE TRANSMISSÃO

A expansão da transmissão no sistema elétrico brasileiro é uma questão complexa dadas as suas particularidades distintas de atendimento: (i) crescimento de carga quase

contínuo durante muitos anos; (ii) exploração de novas bacias hidrográficas; (iii) grandes linhas de transmissão para interconectar novas hidroelétricas localizadas longe dos centros de carga; (iv) troncos para ligar bacias hidrográficas de sazonalidade distintas; (iv) integração do Sistema Isolado (SI) ao SIN e (v) integração de fontes renováveis.

Na Brasil, a expansão da transmissão vem apresentando um crescimento significativo por meio da participação individual ou em consórcio dos investidores nacionais e estrangeiros nos leilões. Inicialmente, a primeira oportunidade de investimento privado em rede de transmissão promovida pela ANEEL em 1999 representou uma expansão de 758 km do SIN, com um investimento total de US\$ 200 milhões em novas instalações. Desde então, considerando os empreendimentos leiloados e os autorizados, foram concedidos mais de 77 mil quilômetros de novas linhas com investimento superior a US\$ 45 bilhões, duplicando a capacidade de transmissão do SIN em um período de dezessete anos (1999-2016). A Tabela 1 mostra o incremento de novos circuitos implementados no período.

Ano	Número de Lotes Leiloados	Número de Lotes Não Leiloados	Extensão Adicional em Km	Extensão da Rede em Km
1999	2	-	758	63.971
2000	7	-	4.495	64.729
2001	7	-	711	69.224
2002	8	-	1.850	69.935
2003	7	-	1.771	71.785
2004	13	-	3.772	73.556
2005	7	-	3.056	77.329
2006	13	-	3.275	80.385
2007	7	-	1.930	83.660
2008	29	-	10.508	85.590
2009	20	-	3.497	96.097
2010	19	2	1.829	99.595
2011	23	1	4.069	101.424
2012	20	3	6.863	105.492
2013	24	10	9.195	112.355
2014	13	13	5.144	121.550
2015	8	16	5.373	126.694
2016	32	13	9.528	132.067
<b>Total</b>	<b>259</b>	<b>58</b>	<b>77.624</b>	<b>141.595</b>

Tabela 1 – Evolução da Rede de Transmissão de Alta Tensão – Fonte: ANEEL/ONS

A Figura 2 mostra uma estimativa do valor do investimento nos projetos de transmissão no período entre 1999 e 2016. Conforme pode ser visto na Figura 2, os financiamentos da expansão da transmissão envolvem grandes quantidade de recursos, sendo uma questão crucial para os investidores e também para o SEB. O investimentos na transmissão representam cerca de 20% de todos os investimentos no SEB, incluindo a geração e a distribuição. A expansão torna possível os projetos de longo período de maturação, como no caso

das linhas de transmissão, que são importantes para garantir o fornecimento de energia elétrica e para manter afastado os riscos que poderiam dificultar o crescimento econômico do país.

Desde a revisão do modelo do Setor Elétrico Brasileiro em 2004, o modelo de expansão da geração e da transmissão tem como base os contratos de longo prazo comercializados nos leilões regulados, tendo como principal agente financiador o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). O BNDES vem financiando a implantação de linhas de transmissão, totalizando entre 2003 e 2015 financiamentos da ordem de US\$ 12 bilhões, de um investimento total de cerca de US\$ 24 bilhões. O período de financiamento padrão é de doze anos, com taxas de juros de longo prazo e baixo risco de *spread*. Durante a construção, o BNDES aceita garantias financeiras de mercado para evitar compromissos de caixa do projeto. Durante o período operacional, as garantias financeiras para o BNDES são baseadas em recebíveis futuros, uma vez que os investidores que vencem os leilões de concessão de novos circuitos recebem um contrato de concessão de 30 anos, com uma RAP baseada na oferta vencedora.

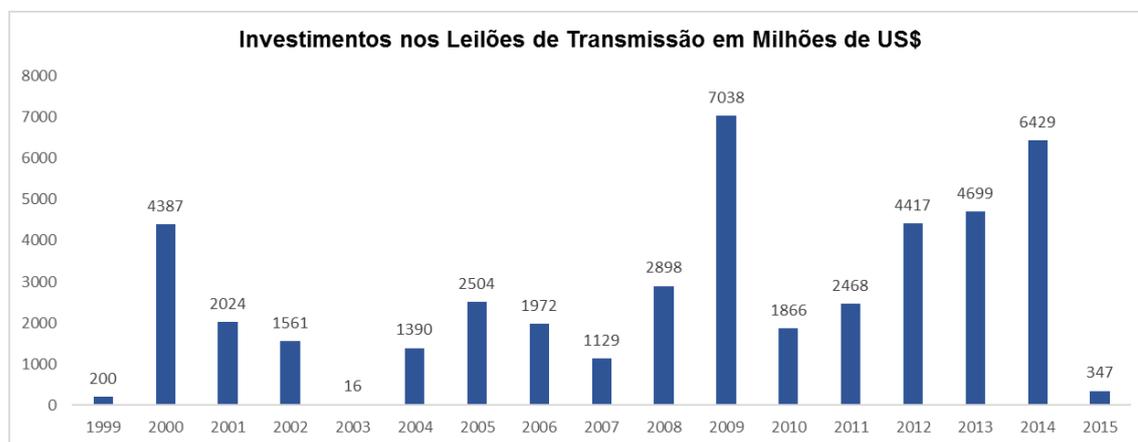


FIGURA 2 – Investimentos Anuais para os Projetos de Transmissão

O risco de crédito dos contratos de transmissão é fortemente atenuado, dado que todos os usuários (geradores, distribuidores e consumidores livres) assinaram Contratos de Uso de Transmissão (CUST), para suportar as receitas de todos os contratos dos transmissores. O risco é sistêmico, o que aumenta a confiança do credor, reduzindo os custos de financiamento.

Atualmente, considerando a redução da capacidade de crédito do BNDES estima-se que a dificuldade de financiamento será uma das principais barreiras para a expansão do setor elétrico. Nesse sentido, a busca de estratégias e ferramentas para financiar a expansão do setor com base em experiências nacionais existentes em outros setores industriais e em experiências internacionais, que sejam aderentes com a regulação e com as práticas comerciais deste setor pode ser de grande contribuição.

Com o passar do tempo, a confiança na fórmula de leilões de transmissão aumentou e a concorrência por novas concessões foi intensificada. Como resultado, os deságios na RAP com relação aos limites máximos iniciais definidos pela ANEEL se ajustaram para valores mais consentâneos com o mercado.

A Figura 3 mostra uma evolução do deságio médio dos leilões, desde 1999 até 2015. Inicialmente o deságio era baixo devido ao baixo número de concorrentes e reduzida presença de investidores nacionais privados. Com o tempo, investidores privados, nacionais e estrangeiros, vieram para a arena de leilões de transmissão, e a concorrência melhorou continuamente com deságios mais elevados.

A Figura 4 mostra a evolução da participação dos investidores em cada novo leilão de transmissão por ano. A participação média de investidores é de 46% para as concessionárias estatais, 21% para os investidores privados nacionais e 33% para os investidores estrangeiros.

A Figura 5 mostra o aumento da receita anual de transmissão aprovada pela ANEEL. O aumento real das receitas é puxado pelas expansões da rede. Como pode ser visto, os novos circuitos recuperam a capacidade do sistema, enquanto também aumentam o custo de transmissão para os clientes finais. O impacto tarifário é amortecido pelo aumento da demanda no SEB.

A redução da receita total no ciclo 2012/2013 na Figura 5 foi devida a uma nova regulamentação do governo federal, a Medida Provisória 579 de 2012, convertida na Lei 12.783/13, na qual concessões antigas poderiam ser renovadas antecipadamente pelas próprias concessionárias, se as mesmas aceitassem reduções em torno de 50% sobre a receita e mais um ressarcimento pelo valor contábil residual dos ativos depreciados. De acordo com este regulamento, os ativos existentes até 2000 foram considerados depreciados e os novos investimentos realizados após 2000 serão reembolsados através das tarifas de transmissão, com adição na RAP de 64 bilhões de reais, a serem pagos em oito anos a partir de 2017. A pergunta que se faz é não teria sido melhor manter a receita na renovação e deixar a depreciação no âmbito do negócio de transmissão? A resposta é sim.

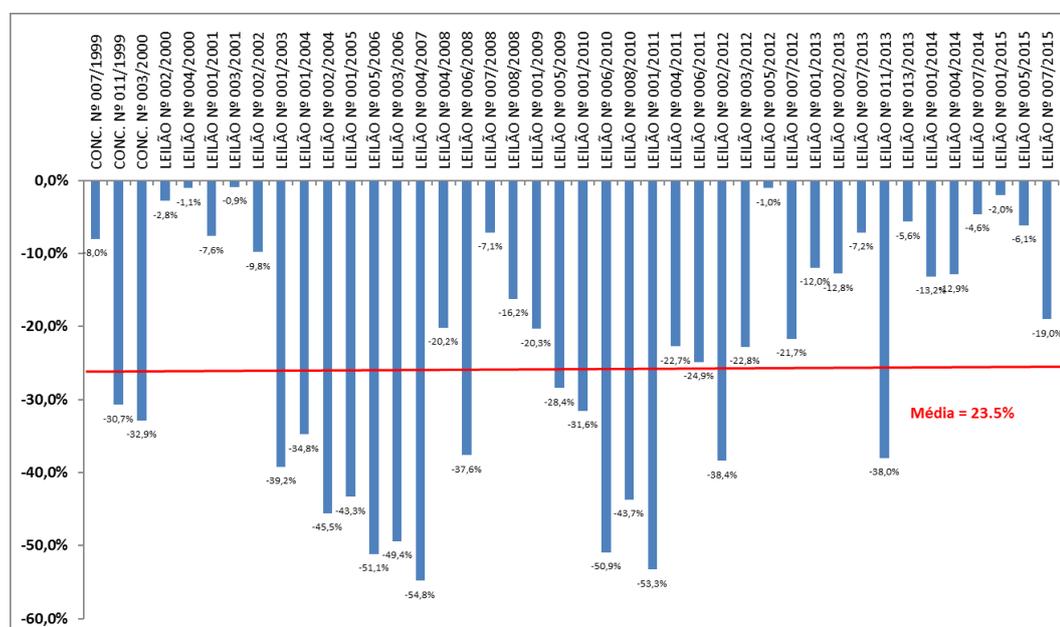


FIGURA 3 – Deságio Médio dos Leilões de energia – Fonte: ANEEL

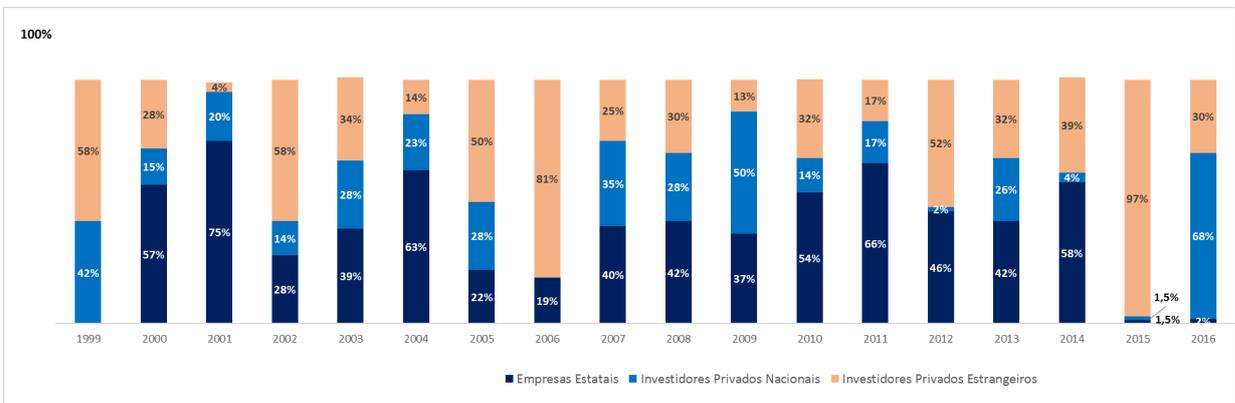


FIGURA 4 – Participação Pública e Privada nos Leilões de Transmissão de Energia

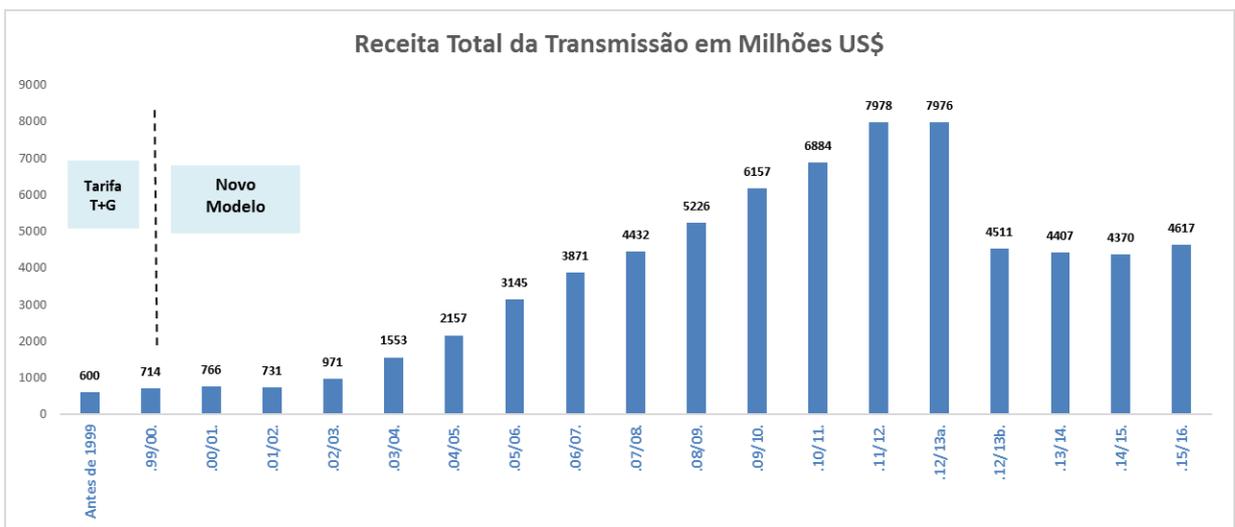


FIGURA 5 – Histórico de Receita da Transmissão (RAP)

### 3 | TARIFAS DE USO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO (TUST)

O SIN é composto por uma série de ativos de transmissão pertencentes a vários proprietários, empresas de transmissão, desagregadas ou não, que constitui a principal rede de transporte de energia do país. A administração dos serviços de transmissão é realizada pelo ONS. As transmissoras celebram Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST) com o ONS, onde se inclui uma série de procedimentos a serem seguidos por ambos. Por outro lado, cada um dos usuários do SIN assinam o contrato de uso do sistema de transmissão (CUST) com o ONS, onde se incluem uma série de normas, o volume contratado (MUST) e a subordinação do pagamento conforme as tarifas de transmissão (TUST) calculadas periodicamente pela ANEEL.

O principal objetivo da TUST é ratear os custos devidos aos investimentos e O&M realizados pelas empresas de transmissão na Rede Básica, remunerados pela Receita Anual Permitida (RAP). A metodologia da tarifa de transmissão define as tarifas TUST para cada usuário, produtor ou consumidor de acordo com seu ponto de conexão com o SIN.

O cálculo do TUST baseia-se numa simulação do Programa Nodal, que é um modelo computacional que calcula os sinais econômicos a serem aplicados conforme a localização

da geração e carga e também às condições de carga da rede elétrica, considerando ainda um fator de compartilhamento de 50% para geração e 50% para as cargas da RAP total das concessionárias de transmissão.

#### 4 | DESAFIOS ATUAIS PARA O SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão brasileiro apresentou crescimento significativo nos últimos 18 anos, com um incremento de linhas de transmissão acima de 230 kV de mais de 77 mil km demonstrando o resultado de investimentos maciços nesse setor a fim de assegurar um abastecimento de eletricidade seguro ao país. Em relação à esse aumento, 9.496 quilômetros, ou 12%, foram devidos à implantação dos dois bipolos do sistema de transmissão associados às usinas de Santo Antônio e Jirau no Rio Madeira, uma das recentes explorações associadas à Bacia Amazônica.

A implementação dos dois bipolos da Madeira em 2013 foi um primeiro resultado dos estudos brasileiros de planejamento da expansão que indicou a exploração da energia hidroelétrica nos rios do Amazonas como a principal alternativa à expansão da geração de energia elétrica no país. Os grandes projetos de geração planejados são as explorações do Rio Madeira, com a construção das usinas de Jirau e Santo Antonio, no Rio Xingu, com a construção da usina de Belo Monte e outras explorações no rio Tapajós, cada um deles com capacidade instalada de mais de 6.000 MW. A energia gerada nas explorações amazônicas deveria ocorrer por meio de troncos de transmissão com mais de 2.000 km.

Estudos de planejamento comparando o desempenho técnico e econômico de alternativas de transmissão em corrente alternada (AC) ou corrente contínua (**DC**) para a transmissão destes blocos de energia (acima de 6.000 MW), considerando distâncias superiores à 1.500 km, indicam que a implantação de links DC é uma alternativa mais atraente. Portanto, já temos os seguintes troncos de transmissão em operação, em construção ou planejados:

- O sistema de transmissão da Madeira, constituído por dois bipolos de corrente contínua, com tensão de  $\pm 600$  kV e potência de 3.150 MW cada e distâncias de 2.366 km e 2.382 km, já em operação;
- Sistema de transmissão de Belo Monte, composto por dois bipolos de corrente contínua, com tensão de  $\pm 800$  kV e potência de 4.000 MW cada e distâncias de 2.140 km e 2.439 km, ambos em construção;
- Reforço nas interligações N - S e NE - SE, composto por dois bipolos de corrente contínua, com tensão de  $\pm 800$  kV e potência de 4.000 MW cada e distâncias de 1.460 MW e 1.940 MW, ambos já planejados, mas ainda não iniciados.

Além desses links, a EPE está desenvolvendo os estudos de planejamento do sistema de transmissão associados à exploração do rio Tapajós, que provavelmente será composto por ligações DC.

Como resultado da tendência de uso de ligações de corrente contínua associadas às

explorações hidroelétricas da região amazônica, deve haver em um horizonte de 5 a 8 anos a existência de 10 ligações de corrente contínua de alta tensão - HVDC (*High-voltage Direct Current*) - integradas ao SIN, com todas as subestações de inversores concentradas na região sudeste do Brasil. Esta nova configuração do SIN é suscetível de trazer muitos desafios ao ONS, principalmente no que diz respeito aos aspectos “*multi-infeed*” de transmissão em larga escala entre mais de duas estações conversoras

## 5 | DESAFIOS ATUAIS PARA O MODELO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

Conforme demonstrado na Tabela 1, a rede elétrica tem aumentado de forma intensiva, com um crescimento exponencial de novos projetos de transmissão. No período de 2004 a 2014, a taxa de crescimento do sistema de transmissão (4,06%) superou a taxa de crescimento da demanda de eletricidade (2,6%). As principais razões para isso são a necessidade de geração de transmissão longe dos centros de carga (por exemplo, para transmitir energia de usinas hidrelétricas na região amazônica e de usinas eólicas na região nordeste do Brasil para os principais centros de carga), a integração das regiões do país e a melhoria do desempenho do sistema de transmissão.

O sucesso do modelo da expansão da transmissão do SEB pode ser evidenciado pela atração de investimentos privados nacionais e estrangeiros, como apresentado na Figura 4. Entretanto, este modelo também enfrenta desafios tais como atrasos na entrega dos projetos por razões relativas à complexidade na obtenção de licenciamentos ambientais, dentre outros aspectos.

A partir de 2010 principalmente, a expansão da transmissão vem ocorrendo de forma dissociada de expansão de geração, incorrendo em um desfasamento entre as datas de entrada em operação de projetos de geração e transmissão. As causas mais frequentes deste desfasamento estão relacionadas aos direitos de uso da terra e ao licenciamento socioambiental na aquisição de novas linhas de transmissão e subestações. O processo de obtenção de licenciamento envolve diversas esferas de órgãos de licenciamento, de nível nacional à municipal, com pouca ou nenhuma coordenação entre eles, afetando o tempo necessário para a obtenção do licenciamento ambiental, para a realização das licitações de leilões, incorrendo em atrasos na implementação do projeto.

O contrato de concessão e a legislação estabelecem intervenções quanto ao desempenho para as empresas de transmissão, o que inclui aplicação de penalidades em caso de atraso na implantação e na entrada da operação comercial. A incerteza nos custos e no período de obtenção do licenciamento e no atendimento dos prazos de obras entre outras razões, vem expondo as empresas de transmissão a riscos financeiros em caso de atraso.

Conforme pode ser evidenciado na Tabela 1, desde 2010, o número de lotes que não obtiveram a presença de licitantes, aumentou devido à falta de interessados. As dificuldades de implantação, combinado com o valor teto e o retorno aprovado para os projetos, definido pelo governo, ou seja os riscos, fez com que os investidores se retraíssem e mostrassem um menor interesse nos leilões de transmissão. Além disso, as condições macroeconômicas

atuais no Brasil não são mais tão atrativas para os investimentos devido à retirada da fonte de financiamento.

Em abril de 2017, conforme informação disponibilizada no site da ANEEL, cerca de 65% dos projetos de transmissão (217) em andamento estão atrasados, com um atraso médio de 1100 dias. Para mitigar este problema a ANEEL alterou o o tempo médio especificado nos leilões, assumindo tempos mais realistas para o licenciamento e a construção dos projetos de transmissão, conforme apresentado na Figura 5.

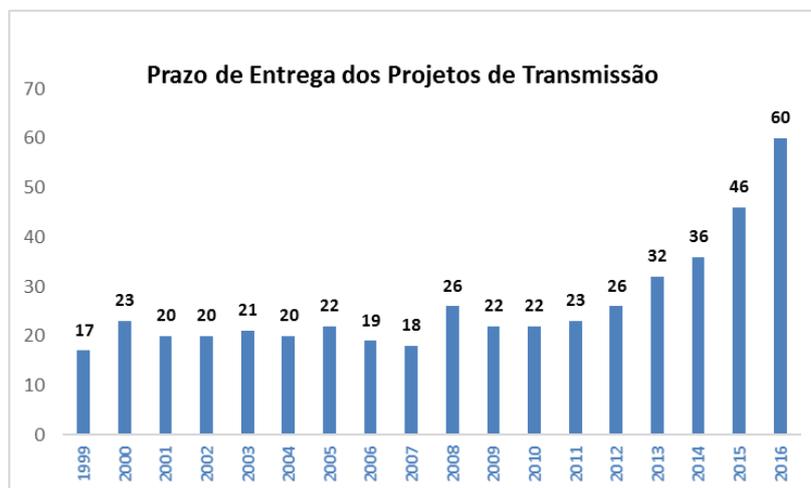


FIGURA 5 – Histórico do Prazo de Entrega dos Projetos de Transmissão (em meses)

Atualmente os projetos em andamento estão sob a responsabilidade de dez empresas de transmissão no país. A necessidade de investimentos em transmissão está aumentando, sem que tenha se observado aumento proporcional no número de empresas no mercado.

## 5.1 SUGESTÕES PARA APRIMORAMENTO

Para lidar com o cenário atual do país, estão sendo discutidas várias medidas para melhorar o modelo de expansão da transmissão, dentre elas destaca-se:

- Definição das novas obras e reforços na transmissão, a serem leiloadas, com maior antecedência;
- Avaliação dos custos reais integrados de geração e transmissão na seleção de projetos, visando uma seleção integrada dos melhores projetos para licitação;
- Integração de leilões para projetos de geração e transmissão, o que inclui uma condução paralela das licitações, ou até mesmo a atribuição de alguns projetos de transmissão sob responsabilidades da geração;
- Discussão de alternativas para reduzir a complexidade do licenciamento ambiental;
- Melhorias na coordenação dos vários organismos de licenciamento com o estabelecimento de procedimentos de tempo de resposta;
- Reforço do papel do Estado e melhorias nos direitos de uso da terra e no licenciamento socioambiental, a fim de mitigar os atrasos e aumentar a atratividade das concessões de transmissão;

- Aquisição de licenciamento prévio pelas instituições governamentais antes dos leilões de transmissão pode auxiliar os investidores a estimar os esforços na fase de implantação;
- Aumento dos prazos de execução dos projetos (até 60 meses);
- Incentivo à antecipação do projeto prevista no contrato de concessão;
- Incentivar maior flexibilidade permitindo a entrada parcial da carteira de projetos no mesmo contrato, com apropriação de receita associada, proporcional a RAP;
- Melhor definição dos riscos contratuais de concessão;
- Atualização no banco de preços (custos ambientais, terrenos e equipamentos especiais) da ANEEL de forma que a receita teto seja calculada de forma justa e atualizada;
- Melhorias na definição do valor teto da RAP e do custo médio ponderado do capital (WACC regulatório) nos leilões;
- Avaliação de outras alternativas de financiamento, além do BNDES, que possam incorporar riscos cambiais e prazo diferenciados;
- Melhoria da regulamentação existente, com foco na qualidade, eficiência operacional e disponibilidade do serviço de transmissão, com penalidades mais justas;
- Gerenciamento da operação e manutenção realizadas pelas concessionárias na prestação de serviços de transmissão;
- Maior controle do desempenho técnico durante a prestação do serviço de transmissão (períodos de operação e manutenção).

## 6 | CONCLUSÃO

Os leilões de transmissão foram implementados no Brasil após a reestruturação do setor de energia. O planejamento da expansão da transmissão é centralizado e determinado pelas instituições governamentais (MME e EPE), com implementação descentralizada por meio de leilões de concessão de transmissão. Os efeitos positivos foram evidenciados pela atração de investimentos privados nacionais e estrangeiros. Nos últimos dezessete anos, a capacidade do Sistema Interligado Nacional duplicou. Leilões e novos reforços aumentaram as margens de segurança do sistema, proporcionando maior capacidade de intercâmbio para otimizar o despacho hidrotérmico e ampliar a confiabilidade dos principais centros de carga. Embora este modelo tenha tido grande sucesso, recentemente tem enfrentado alguns desafios no atual contexto do Brasil. A discussão de várias propostas de aprimoramento está em curso no país visando constituir condições que assegurem a disponibilidade de linhas e sistemas de transmissão no tempo adequado e com a qualidade necessária para o suprimento de energia elétrica, bem como a continuidade da participação do capital privado, com redução da incerteza do licenciamento social e ambiental, assim como oferecendo meios e fontes de financiamento direcionados e adequados para a expansão da infraestrutura. Somente através de abordagem abrangente e multidisciplinar, com a participação de todos, ou seja

governo, formuladores de planos e políticas, regulador, agentes, instituições financeiras nacionais, internacionais e multilaterais, órgãos ambientais e sociedade, sintonizados com as metas do país, e com a solução para os atuais problemas do setor elétrico brasileiro podem produzir o aprimoramento do modelo que vem sendo utilizado com sucesso no país..

## REFERÊNCIAS

(1) A. Castro, A. Perlingeiro, J. C.O. Mello - “*An overview of the transmission concessions auctions – statistical analysis of bids and results*”, Paper C5-301, 2006 Cigré Session.

(2) R.S.Ferreira, H.Rudnik and L.Barroso – “*The expansion of Transmission*”- IEEE power and energy magazine – July/August 2016.

(3) F. Regairaz , M.R. Hesamzadeh, Y. Tohidi, A. Keech, A. Di Caprio,A. Balkwill, J. Doherty, S. Lewis, J. Owen, P. Hynes,F-P. Hansen, J. Gilmore, J. C. O. Mello, E. M. A. Neves, Dalton O. C. Brasil – “*Market price signals and regulatory frameworks for coordination of transmission investments*” – Techinal Brochure - CIGRE Work Group C5-18.

João Carlos de Oliveira Mello é Doutor em Engenharia Elétrica pela PUC/RJ, Presidente da Thymos Energia e coordenador do Grupo C5 do Cigré.

Evelina Neves – É Mestre em Engenharia Elétrica e Doutora em Física Computacional pela Universidade de São Paulo, e possui MBA em Regulação de Mercados pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE) e Consultora Sênior na Thymos Energia.

Dalton de Oliveira Camponês do Brasil é Mestre em Engenharia Elétrica, Assessor Técnico da Diretoria de Administração da Transmissão do ONS e coordenador do Comitê de Estudos C4 do Cigré Brasil.

Thais é doutoranda na Universidade de São Paulo e Diretora Executiva da Thymos Energia.

Eduardo Nery é atualmente diretor e CEO da Energy Choice Consultoria e Negócios.

## MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO EM INSTALAÇÕES DE CORRENTE CONTÍNUA – DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MEDIÇÃO PARA ATENDIMENTO AOS LIMITES DEFINIDOS PELA ANEEL

*Data de aceite: 02/06/2020*

**Athanasio Mpalantinos Neto**

CEPEL

**Carlos Ruy Nunez Barbosa**

CEPEL

**Luís Adriano de Melo Cabral Domingues**

CEPEL

**Paulo Roberto Gonçalves de Oliveira**

CEPEL

**Rafael Monteiro da Cruz Silva**

ELETROBRAS

**Júlio César A. de Aguiar**

ELETROBRAS

**RESUMO:** A construção de grandes linhas de transmissão associadas aos projetos do Madeira e Belo Monte expôs a carência de ferramentas de cálculo e dados de medições em instalações em operação para linhas de transmissão em corrente contínua. Se, no caso de linhas em corrente alternada, os métodos de cálculo funcionam a contento e há um grande acervo de medições em instalações em operação, em de corrente contínua o quadro é sensivelmente diferente. Por outro lado, a evolução da Legislação e da Regulamentação referentes à exposição a campos elétrico e magnético levou, na

Resolução Normativa ANEEL 616, de 1 de julho de 2014, ao estabelecimento de limites para instalações em corrente contínua, demandando das empresas a realização de medições de campos nas instalações em operação.

Este trabalho descreve o planejamento e a realização de medições em linhas de transmissão e estações conversoras, com a finalidade de atender aos requisitos da RN 616 e também iniciar a montagem de um banco de dados de medições visando orientar e validar o desenvolvimento de métodos de cálculo específicos para instalações em corrente contínua.

Neste IT são inicialmente apresentados os instrumentos utilizados para medição de campo elétrico em corrente contínua, descritos o processo de funcionamento das sondas, o arranjo desenvolvido para os testes de laboratório, o método de ensaio para calibração das sondas e a metodologia para realização da medição no campo. Em seguida são descritas as campanhas de medição realizadas, tanto em linhas de transmissão quanto em estações conversoras, e apresentados os resultados das medições. Finalmente é feita a análise desses dados enfatizando a variabilidade elevada dos resultados e sua dependência das condições meteorológicas - temperatura,

umidade, velocidade e direção do vento e indicada uma metodologia adequada para o cálculo de campo elétrico em corrente contínua.

**PALAVRAS-CHAVE:** Campo Elétrico, Linhas de Transmissão, Estações Conversoras, Corrente Contínua

## 1 | INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão em corrente contínua no Brasil teve início com a entrada em operação dos dois bipolos de  $\pm 600\text{kV}$  de Itaipu em 1984. Posteriormente o CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica realizou uma série de medições nestes bipolos para a avaliação de desempenho destes (1).

Trinta anos depois, o país voltou a construir linhas de corrente contínua, Sistema de Transmissão do Madeira - Porto Velho-Araraquara,  $\pm 600\text{kV}$ , em operação desde 2014, e o Sistema de Belo Monte planejado para  $\pm 800\text{kV}$ . A transmissão em corrente contínua se apresenta como uma alternativa e uma tendência para transmissão de grandes blocos de energia.

Em 2009 entrou em vigor a Lei 11934(2) que dispõe sobre exposição humana a campos elétricos e magnéticos, com as regulamentações da ANEEL Resoluções Normativas 398(3) e 413(4) de 2010 que estabelecem limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, porém apenas para a frequência de 60Hz. Em 2014 foi então publicada a resolução normativa 616 da ANEEL (5) que passou a incluir campos elétricos e magnéticos gerados por instalações de 50Hz e corrente contínua.

Estes trinta anos (1984-2014) representam uma grande lacuna de dados de medição em linhas de corrente contínua. Adicionalmente deve-se notar que o comportamento do campo elétrico em corrente contínua e, por consequência, os instrumentos e técnicas de medição, diferem consideravelmente da corrente alternada. As medições de campo elétrico em corrente contínua dependem muito das condições ambientais, principalmente da velocidade e direção do vento, já que este interfere diretamente no ambiente elétrico da linha de transmissão, transportando os íons gerados nos polos. Além disso, foi identificada, no laboratório e durante o processo de medição, a exigência de uma atenção maior no procedimento de calibração das sondas (zerar) a cada novo ponto de medição e também da qualidade do ponto de aterramento dos instrumentos.

Visando preencher esta lacuna de dados, ao atendimento da Resolução Normativa 616 aplicada as instalações existentes e as futuras demandas do setor elétrico, o CEPEL em conjunto com a ELETROBRAS, Furnas e Eletronorte realizaram uma série de medições de campo nos bipolos do Sistema de Transmissão de Itaipu e nas Estações Conversoras de Foz do Iguaçu, Ibiúna e Araraquara, além de uma série de ensaios em laboratório para avaliação do comportamento das sondas e para definição do arranjo de medição.

Neste trabalho são inicialmente apresentados os instrumentos utilizados para medição de campo elétrico em corrente contínua, descritos o processo de funcionamento das sondas, o arranjo desenvolvido para os testes de laboratório, o método de ensaio para calibração das sondas e a metodologia para realização da medição no campo.

Em seguida são descritas as campanhas de medição realizadas, tanto em linhas de transmissão quanto em estações conversoras, e apresentados os resultados das medições.

Finalmente é feita a análise desses dados enfatizando a variabilidade elevada dos resultados e sua dependência das condições meteorológicas - temperatura, umidade, velocidade e direção do vento e indicada uma metodologia adequada para o cálculo de campo elétrico em corrente contínua.

## **2 | ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

### **2.1 Funcionamento das sondas**

A medição de campo elétrico de corrente contínua é feita por de uma sonda, que através de um sistema de membrana vibratória, ou mecanismo de rotação, consegue ser sensibilizada com o campo elétrico contínuo. Esta sonda é ligada ao medidor de campo elétrico, que faz a leitura e interpretação das informações enviadas pela sonda.

O que se faz tradicionalmente e construir uma placa metálica, aterrada, para criar uma superfície plana, onde o campo é vertical e posicionar a sonda no centro (sem contato com placa), conforme a Figura 1 A.

Por se tratar de medições de curta duração em conversoras e linhas de transmissão e pela dificuldade de escavar o solo em alguns pontos (asfalto de arruamentos) resolveu-se adotar a configuração da Figura 1 B nos ensaio de laboratório e posteriormente no campo.

### **2.2 Arranjo do ensaio de laboratório**

No laboratório do CEPEL foram construídas duas placas paralelas de alumínio com dimensões de 2m x 2m de bordas arredondadas. Estas dimensões foram obtidas através de simulação digital desenvolvida no programa TRICAMP (6) de forma que produzissem um campo uniforme na região central onde será colocado o arranjo placa/sonda de campo elétrico, como pode ser observado na Figura 2.

A parte de baixo no formato de uma mesa apoiada no solo foi aterrada e colocado no seu centro o arranjo placa/sonda de campo elétrico, para reproduzir a situação da Figura 1 B e a outra placa foi suspenso por uma cadeia de isoladores a 1m da superfície da placa/sonda. Nesta última foi aplicada tensão, de polaridades positiva e negativa até 200 kV, dependendo do tipo de sonda.

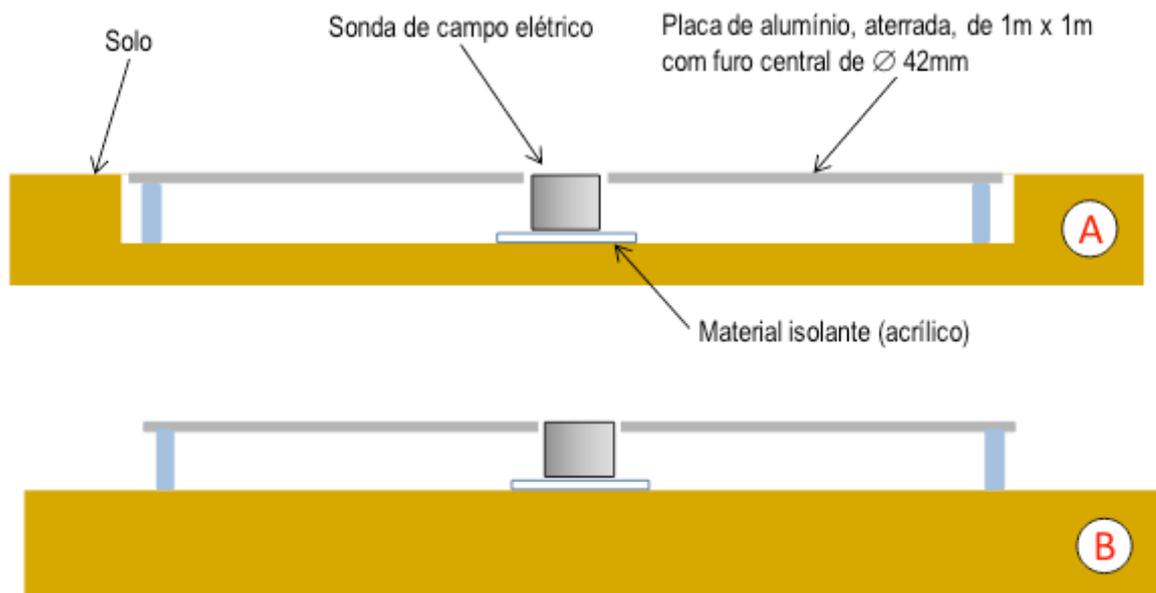


FIGURA 1 – Placa Metálica para posicionamento da sonda



FIGURA 2 – Arranjo de Ensaio

### 2.3 Calibração das sondas

Foram ensaiadas quatro tipos de sondas, diferenciadas pela faixa de medição de campo elétrico e pela sua montagem de fábrica (tipo E ou tipo F). As faixas de leitura estão descritas na Tabela 1.

O leitor das sondas é o mesmo para todos os tipos e a leitura do campo elétrico não é direta. Para cada tipo de leitor existe um fator de conversão do valor mostrado no visor do leitor para o valor do campo elétrico, para cada tipo de sonda usado.

As sondas foram ensaiadas aplicando-se diferentes níveis de tensão de acordo com seu tipo, Tabela 1, com polaridade positiva e negativa. A tensão aplicada, devido às condições do ensaio, foi limitada no máximo de 200 kV.

Tipo de sonda	Faixa de campo elétrico (kV/m)	Tensão de ensaio (kV)	Passo (kV)
E2 ou F2	0 a 10	0 a 10	5
E3 ou F3	0 a 100	0 a 100	10
E4 ou F4	0 a 1.000	0 a 200	20
E5 ou F5	0 a 2.000	0 a 200	20

Tabela 1 – Faixa de leituras das sondas

Todas as sondas foram testadas “embutidas na placa”, Figura 1 B, e acomodadas em cima da mesa, tanto as do tipo F como as do tipo E, constatou-se uma melhor resposta quando estão montadas conforme a figura 1 B.

As sondas dos tipos E3 ou F3 foram as mais utilizadas pelo CEPEL para as medições de campo elétrico nas estações conversoras e nas linhas de transmissão por seu melhor desempenho uma vez que sua faixa de leitura ser mais compatível com os valores encontrados em campo.

### 3 | MEDIÇÕES DE CAMPO

#### 3.4 Instrumentos utilizados nas campanhas de medição

O CEPEL utilizou os seguintes instrumentos para a realização das medições:

- Medidor e sonda de campo elétrico CC
- Medidor de campo magnético CC
- Medidor de temperatura e umidade relativa do ar Vaisala
- Anemômetro Brunton-ADC-Wind

Todos os instrumentos estavam com o certificado de calibração válido. As fotos dos mesmos podem ser observadas nas figuras 3, 4, 5 e 6.



Figura 3 – Medidor de campo elétrico



Figura 4 – Medidor de campo magnético



Figura 5—Medidor de temperatura e umidade relativa do ar



Figura 6—Anemômetro Brunton-ADC-Wind

### 3.2 Metodologia Desenvolvida

Os instrumentos e por conseguinte as técnicas de medição de corrente contínua diferem consideravelmente das de corrente alternada.

A primeira tarefa, em geral realizada ainda no escritório, foi a de, a partir das plantas e imagens da linha de transmissão e da estação conversora, definir os pontos onde serão realizadas as medições. Já no local, estes pontos pré-definidos são reavaliados e confirmados logo no início dos trabalhos. As premissas para a escolha destes pontos em linhas de transmissão e na estação conversora são descritos a seguir.

Para a linha de transmissão foram definidos perfis transversais a linha de transmissão e nestes perfis pontos que proporcionem uma comparação tanto com outras medições quanto a valores calculados. Foram medidos pontos no limite da faixa de servidão, no centro e a 15 m dos pólos.

Para a estação conversora na área energizada, de acesso apenas de trabalhadores (espaço ocupacional), foram medidos em lugares de maior circulação e arruamentos. Também foram escolhidos alguns pontos nas áreas externas, onde pode haver circulação de todo o público.

Para cada ponto de medição os equipamentos foram acomodados em uma mesa, Figura 7, as sondas calibradas e acondicionadas na placa metálica, Figura 8, e realizado o aterramento do medidor de campo elétrico e da placa equalizadora. A seguir foram verificados os valores de campo elétrico, direção e velocidade do vento, umidade e temperatura de forma simultânea.

Foi constatado, tanto no campo quanto em laboratório, a importância de assegurar o bom aterramento dos equipamentos e a calibração das sondas a cada novo ponto de medição para obtenção de resultados confiáveis.

Foram realizadas 10 verificações dos valores medidos com o intervalo de 1 min, conforme definido nos ensaios de laboratório. Este valores são registrados em uma planília,

apresentada na Figura 9, para posterior digitalização e análise.



PLANILHA DE MEDIÇÃO DE PERIFIS DE V  
CAMPO ELÉTRICO (CE) E MAGNÉTICO (CM) - CEPEL

EMPRESA: Eletrobras Cepel

IDENTIFICAÇÃO: PONTO # DATA: 01/05/2016 HORA: INICIO # FIM #  
LUGAR #  
FERRAL #  
MEDIDA EM RE: PUNTO LIBERAL - 100% PACKING #  
MEDIDA EM TORRE: TORRE INICIAL (TI) # TORRE FINAL (TF) # DIST. TI (m) #

CONDIÇÕES DA MEDIÇÃO: TENSÃO (kV) # CORRENTE (A) # TEMP (°C) # URUM #

CAMPO ELÉTRICO (CE) E MAGNÉTICO (CM):  
MEDIDOR CE: TRIFIELD M3 369  
MEDIDOR CE: LEROR # (L) 2170 - (L) 117 AB CASO # (L) JOURTO - (L) LONGOR  
SOMIA - CA # MOEDA # (L) F2 - (L) F3 - (L) F4 # SÉRIE # ZEROS #

MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO - NO PONTO #

VALOR	MEDIÇÃO CE			MEDIÇÃO CM			VENTO	V
	CE	CM	CM	CM	CM	CM		
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								
46								
47								
48								
49								
50								
51								
52								
53								
54								
55								
56								
57								
58								
59								
60								
61								
62								
63								
64								
65								
66								
67								
68								
69								
70								
71								
72								
73								
74								
75								
76								
77								
78								
79								
80								
81								
82								
83								
84								
85								
86								
87								
88								
89								
90								
91								
92								
93								
94								
95								
96								
97								
98								
99								
100								

NOTAS: \* MEDIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO

FIGURA 7 – Mesa de instrumentos

FIGURA 8 – Placa metálica

FIGURA 9 – Planilha

## 4 | CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

Visando prover as Empresas ELETROBRAS de dados sobre suas instalações de corrente contínua, ao atendimento da Resolução Normativa 616 aplicada as instalações existentes e as futuras demandas do setor elétrico, o CEPEL em conjunto com a ELETROBRAS, Furnas e Eletronorte realizaram uma série de medições de campo nos bipolos do Sistema de Transmissão de FURNAS e nas Estações Conversoras de Foz do Iguaçu, Ibiúna e Araraquara.

A seguir serão apresentados as medições realizadas na linha de transmissão e na estação conversora de FURNAS de forma a exemplificar o desenvolvimento do trabalho de medição e os resultados obtidos.

### 4.1 Linha de Transmissão

Foram realizados perfis de campo elétrico, ao nível do solo, em um vão da linha de transmissão corrente contínua de ±600 kV de FURNAS. O processo de montagem dos equipamentos no vão da linha de transmissão para medição pode ser observado nas Figuras 10 e 11.



FIGURA 10 - Detalhe do aterramento da placa metálica



FIGURA 11 – Localização do ponto de medição - equipamentos aterrados e calibrados

Nas figuras 12 e 13 são apresentados o croqui com os pontos medidos no perfil e um gráfico com os valores de campo elétrico medidos. Na Tabela 2 são apresentados os valores e a direção predominante do vento durante o processo de medição.

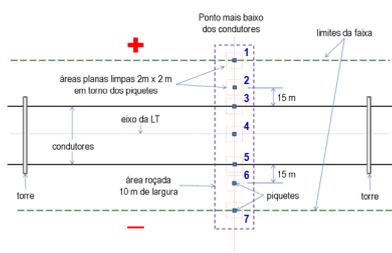


FIGURA 12 – Croqui do Perfil de Medição

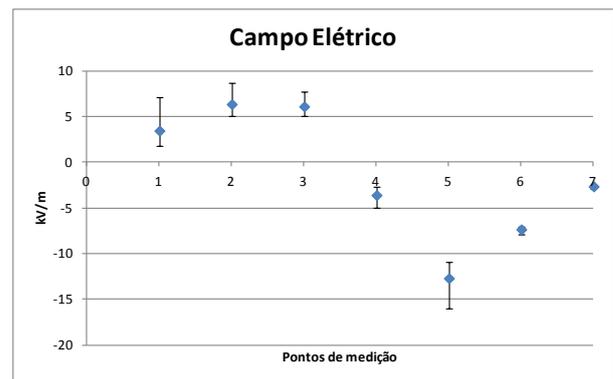


FIGURA 13 – Valores de campo elétrico

Pontos	Vento (m/s)		Direção
	Max.	Min.	
1	3,5	1,5	A
2	4,5	1,8	A
3	3,7	0,0	A
4	4,0	1,3	B
5	2,3	0,0	A
6	3,5	1,6	A
7	2,6	0,9	A

**A = transversal a LT na direção do polo negativo**

**B = 45° a LT na direção do polo negativo**

Tabela 2 – Valores e Direção do Vento

Durante a medição na linha de transmissão os valores de tensão e corrente nos polos são apresentados na Tabela 3.

Polo 1		Polo 2	
Tensão (kV)	Corrente (A)	Tensão (kV)	Corrente (A)
600	2.500	605	2.510

Tabela 3 – Valores de Tensão e Corrente

## 4.2 Estação Conversora

Para a Estação Conversora de Foz do Iguaçu foram levantados os pontos de interesse que podem ser observados no croqui apresentado na Figura 14. Os valores de campo elétrico e a direção predominante do vento medidos nestes pontos são apresentados nas Tabelas 4 e 5. A direção predominante do vento está relacionada ao sentido do perfil na conversora. Sendo assim (A) representa o sentido longitudinal, (B) a 45° na direção do perfil, (C) transversal ao perfil e (D) 45° na direção oposta ao perfil.

Durante o processo de medição os valores da corrente nas linhas de transmissão IBIUNA 1 e IBIUNA 2 foram de 2.450 A e 2.480 A, respectivamente.



Figura 14 – Pontos de medição - Estação Conversora

Ponto de Medição	Campo Máximo (kV/m)	Campo Mínimo (kV/m)	Vento Max. (m/s)	Vento Min. (m/s)	Direção
1	-2,17	-1,86	4,0	1,8	C
2	-2,53	-2,29	4,0	1,3	C
3	4,75	2,93	3,5	1,1	B
4	2,00	1,71	3,6	1,0	B
5	-0,60	-0,10	3,2	1,4	B
6	-1,34	-1,02	4,2	2,1	B
7	-1,24	-0,75	4,0	1,5	B
8	4,56	3,00	3,9	1,9	B
9	2,18	1,90	3,9	1,1	B

Obs. Os pontos, 1, 4, 6 e 9 estão localizados a 15 m dos polos. E os pontos 2, 3, 7 e 8 embaixo dos polos.

Tabela 5 – Valores de Campo Elétrico – Estação Conversora – Seção B

Ponto de Medição	Campo Máximo (kV/m)	Campo Mínimo (kV/m)	Vento Max. (m/s)	Vento Min. (m/s)	Direção
1	-3,20	-1,89	2,9	0,7	C
2	2,28	2,04	3,6	0,9	C

Obs. Os pontos 1 a 2 estão localizados embaixo das barras de transferência.

Tabela 4 – Valores de Campo Elétrico – Estação Conversora – Seção A

## 5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

O comportamento do campo elétrico em instalações em corrente contínua difere sensivelmente do que ocorre em corrente alternada em virtude de diferenças no ambiente elétrico e na dinâmica dos fenômenos. Para analisar os resultados de medições ou avaliar métodos de cálculo é importante considerar em detalhes estas diferenças, que ajudam a entender e interpretar.

Para tensões abaixo da tensão de início de corona nos condutores, ocorre sob a linha

um campo eletrostático. Acima da tensão de início de corona, os condutores positivos e negativos da linha de transmissão geram íons de mesma polaridade. Por isto, uma carga espacial de polaridade positiva ocorre sob o condutor positivo e uma carga espacial negativa sob o condutor negativo. Entre os dois polos da linha de transmissão, ocorrem uma mistura de carga espacial positiva e negativa, proporcionando uma recombinação iônica.

A carga espacial produzida pelo corona em um condutor de uma linha de transmissão em corrente contínua tem o efeito de reduzir o campo elétrico na vizinhança da superfície do condutor e aumentar o nível de campo elétrico no solo. O campo elétrico resultante sob uma linha de corrente contínua com corona pode ser assumido como composto de dois componentes: um componente de “campo eletrostático”, produzido pela tensão aplicada à linha e pela geometria da mesma, e outro componente de “campo de cargas espaciais”, produzido pela carga espacial iônica na região entre os eletrodos.

A carga espacial gerada perto de cada condutor é conduzida pelo campo elétrico resultante tanto em direção ao solo, como em direção ao condutor de polaridade oposta, resultando em uma corrente de condução entre os polos e para o solo. Assim há um comportamento “unidirecional” no sentido que as cargas se deslocam ao longo das linhas de campo em direção ao solo ou ao polo oposto, diferentemente do que ocorre em corrente alternada, onde o campo inverte a direção a cada ciclo elétrico, de modo que as cargas ficam sempre na vizinhança dos condutores, sendo recombinadas na sua maioria, não formando uma massa de cargas espaciais importante. Além das cargas geradas por corona ocorrem também cargas geradas por ionização natural, em especial agrupamentos de moléculas (clusters) que perdem um ou mais elétrons, tornando-se eletricamente carregadas; partículas de poluição frequentemente se enquadram neste caso, sendo deslocadas por ação do campo elétrico até algum condutor de polaridade oposta ou aterrado. Isto explica porque é usual ver condutores, equipamentos, paredes enegrecidas em instalações em corrente contínua.

O campo elétrico sob uma linha de transmissão em corrente contínua deve portanto ser caracterizado em termos de três parâmetros básicos:

- campo elétrico -  $E$  (kV/m);
- densidade de carga espacial -  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>);
- densidade de corrente iônica -  $j$  (A/m<sup>2</sup>).

Estas grandezas se relacionam através da seguinte expressão:

$$j = k \cdot \rho \cdot E, \text{ onde } k \text{ é mobilidade iônica.}$$

O campo elétrico em uma linha de transmissão em corrente contínua, Figura 13 e Tabela 2, é muito influenciado por condições ambientais, tais como: velocidade e direção do vento, umidade relativa, a presença e natureza dos aerossóis no ar etc.

Dentre as variáveis atmosféricas o vento (velocidade e direção) é a mais influente, por deslocar a massa de íons, alterando todo o padrão elétrico da LT. Com a ação do vento as cargas não se movem apenas por ação do campo elétrico, mas pelo efeito resultante de campo elétrico e vento.

Dos resultados apresentados pode-se ressaltar a necessidade, tanto na medição quanto no cálculo, de se levar em consideração o vento (velocidade e direção). Neste sentido e apoiado nas medições realizadas pelo CEPEL (1), nas medições apresentadas e nas futuras medições a serem realizadas nos novos projetos em corrente contínua, será iniciada a montagem de um banco de dados de medições visando orientar e validar o desenvolvimento de métodos de cálculo específicos para instalações em corrente contínua. Em paralelo serão desenvolvidos estudos no sentido de levar em consideração a influência das variáveis climáticas na metodologia para cálculo do campo elétrico em corrente contínua (7).

## 6 | CONCLUSÕES

- Este trabalho apresenta os resultados da campanha de medição em linhas de transmissão e nas estações conversoras das empresas ELETROBRAS.
- É apresentada a metodologia utilizada para realização destas medições.
- Foi realizada a análise desses dados enfatizando a variabilidade elevada dos resultados e sua dependência das condições meteorológicas, principalmente o vento (velocidade e direção) e a importância da implementação desta variável nos métodos de cálculo.
- No caso de corrente contínua não tem sentido uma medição pontual como é feito em corrente alternada, tendo em vista a grande variação tanto da velocidade como da direção do vento no momento da medição.
- Finalmente o próximo passo, a partir das medições realizadas pelo CEPEL, será o desenvolvimento de banco de dados visando orientar e validar o desenvolvimento de métodos de cálculo específicos para instalações em corrente contínua.

## REFERÊNCIAS

(1) Dart, F. C., Silva Filho, J. I., Andrade, V. H. G., Domingues, L. A. C. M., “Linhas de Transmissão de Corrente Contínua – Avaliação de Campos Interferentes”, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.

(2) Lei 11943, de 5 de maio de 2009.

(3) Resolução Normativa ANEEL, nº 398, de 23 de março de 2010.

(4) Resolução Normativa ANEEL, nº 413 de 3 de novembro de 2010.

(5) Resolução Normativa ANEEL, nº 616 de 1 de julho de 2014

(6) Domingues, L. A. M. C., Fernandes, C., Dart, F. C., Barbosa, C. R. N., “Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas”, Relatório Técnico 923/95 – DTI/ACET, CEPEL, Rio de Janeiro, 1989.

(7) Maruvada, P. S., “Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines: Comparison of Calculations and Measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, nº. 1, January, 2012.

## AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO NO VIÉS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DOS PLANOS ENERGÉTICOS REFERENCIAIS DO SETOR ELÉTRICO DAS NAÇÕES

Data de aceite: 02/06/2020

**Flavio Minoru Maruyama**  
GEPEA/EPUSP

**Andre Luiz Veiga Gimenes**  
PEA/EPUSP

**Luiz Claudio Ribeiro Galvão**  
PEA/EPUSP

**Miguel Edgar Morales Udaeta**  
GEPEA/EPUSP

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho é avaliar no contexto da análise de custos completos os planos preferenciais energéticos e referenciais do setor elétrico no contexto mundial. Metodologicamente partindo da estrutura dominada do planejamento energético de cada país e sua orientação ao desenvolvimento sustentável restrito e amplo, desenvolve-se uma análise multicritério incorporando as dimensões representativas do desenvolvimento e da atividade socioeconômica como suporte para uma avaliação energética completa. Nesse sentido assume-se a estratificação de países selecionados em grupos, de acordo com, o Produto Interno Bruto por habitante, para uma avaliação completa dentro das quatro dimensões do desenvolvimento (no

seu viés sustentável): técnico-econômica, ambiental, social e político. A ferramenta metodológica é o Planejamento Integrado de Recursos Energéticos (PIR). Os resultados apresentam o direcionamento, no âmbito do desenvolvimento sustentável, dos planos preferenciais dos países avaliados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Planejamento Energético, Setor Elétrico, PIR, Desenvolvimento Sustentável, Energia.

**KEYWORDS:** Energy Planning, Electric Sector, IRP, Sustainable Development, Energy.

### INTRODUÇÃO

Historicamente, o planejamento estratégico referente a sistemas de energia elétrica é elaborado tendo em vista prioritariamente a relação de custo benefício, relegando às dimensões: ambiental, política e social ao segundo plano, mesmo que estas sejam atingidas de forma direta pelo setor (UDAETA, 1997). Projeções demonstram que, em 2035 o consumo de energia elétrica crescerá 84% em relação ao consumo em 2008 e 63% deste valor será oriundo de combustíveis fósseis (MARUYAMA, 2013). Este prognóstico aponta para um enorme crescimento nos impactos (tanto

econômicos quanto ambientais, sociais e políticos) provenientes da prospecção e utilização desses combustíveis. Neste estudo, utiliza-se do Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR (UDAETA, 2012) como ferramenta de análise, tanto de planos preferenciais estratégicos nacionais do setor elétrico, quanto da situação econômica, ambiental, política e social, as dimensões bases do planejamento sustentável, de uma amostra heterogênea de países (países com diferentes realidades ambientais, econômicas e sociais). O objetivo deste trabalho é a análise da aplicação de um planejamento estratégico para o setor em consonância com o desenvolvimento sustentável, não somente ambiental, mas em todas as demais dimensões (isto é, incluindo as outras 3: técnico-econômica, social e política). O planejamento energético dos países é analisado particularmente de forma a possibilitar a realização de uma avaliação em grupos, estratificados por faixas de PIB *per capita*, definindo assim um parâmetro de análise que se relacione diretamente com o desenvolvimento econômico, e, amparados sempre no PIR como instrumento metodológico de análise.

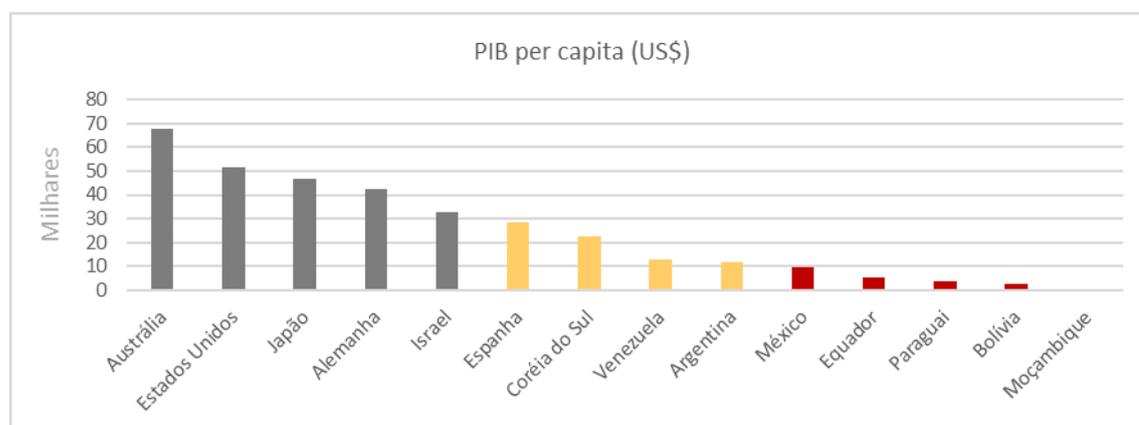
## 1 | PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE COMPARATIVA DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

### 1.1 Amostra de Países e Estratificação em Grupos

Os países selecionados para estudo são: Alemanha, Argentina, Austrália, Bolívia, Coréia do Sul, Equador, Espanha, Estados Unidos, Israel, Japão, México, Moçambique, Paraguai e Venezuela. O objetivo é a seleção de uma amostra heterogênea das características gerais desses países.

Os grupos, selecionados por PIB *per capita*, são:

- Grupo A: Austrália, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Israel;
- Grupo B: Espanha, Coréia do Sul, Venezuela e Argentina;
- Grupo C: México, Equador, Paraguai, Bolívia e Moçambique.



O PIB *per capita* foi um indicador utilizado para a criação de grupos de países uma vez que melhor reflete a situação econômica destes. O PIB apenas não possibilita a identificação de uma situação econômica precária (portanto de pouca flexibilidade) sendo um obstáculo significativo para a aplicação de planos estratégicos visando o desenvolvimento sustentável (RTC/PIRnaUSP 455, 2014).

## 1.2 Quesitos Multicritério para a avaliação de países

A análise segue duas vertentes: Institucional e Não-Institucional. A análise institucional baseia-se nos planejamentos energéticos preferenciais dos países, com a identificação das características do PIR nos referidos planos. Já na Não-Institucional, a base está na situação atual de indicadores específicos, na busca de avaliar as potencialidades do país na direção de uma estratégia energética sustentável, isto é, as facilidades para a aplicação do PIR (segundo metodologia estabelecida em UDAETA, 2012), como também se haveria condições de realizá-lo com eficácia. Essas duas vertentes demonstram se no país analisado já é aplicado um planejamento estratégico direcionado ao desenvolvimento sustentável e a real capacidade do país de realizar um planejamento nesse molde.

### 1.2.1 Critérios para avaliação Institucional

Os planos energéticos nacionais têm como referência de análise a metodologia desenvolvida em Maruyama (2013) que consiste na valoração dos dados de acordo com os critérios do PIR (UDAETA, 2012). Os indicadores selecionados, para cada dimensão, se baseiam no grau de relevância do objetivo da avaliação, o que pode ser evidenciado através da Tabela 1:

Dimensão	Critério	Indicador	Valoração
Ambiental	1	Consideração dos impactos no meio aéreo dos recursos planejados	0 a 2
	2	Consideração dos impactos no meio aquático dos recursos planejados	0 a 2
	3	Consideração dos impactos no meio terrestre dos recursos planejados	0 a 2
	4	Consideração dos impactos na biodiversidade da região devido aos recursos planejados	0 a 2
	5	Análise e restrição dos recursos energéticos visando a sustentabilidade	0 a 2
Política	6	Consideração do apoio político no planejamento energético: aspectos legais, instrumentos políticos	0 a 2
	7	Consideração da conjunção de encontro de interesses entre os Envolvidos e Interessados	0 a 2
	8	Consideração do grau de aceitação dos recursos energéticos pelos Envolvidos e Interessados	0 a 2
	9	Consideração do grau de motivação dos agentes Envolvidos e Interessados	0 a 2
Social	10	Consideração da Posse, Propriedade e Integração Energética dos Recursos	0 a 2
	11	Consideração do recurso no desequilíbrio ambiental no meio social	0 a 2
	12	Consideração da influência dos recursos energéticos na melhoria dos indicadores sociais	0 a 2
	13	Consideração do recurso na geração de empregos diretos e em qualidade e segurança	0 a 2
	14	Consideração do impacto da ocupação espacial de projetos	0 a 2
Técnico-Econômica	15	Consideração na alteração de percepção de conforto: Olfativa, Sonora, Térmica ou Visual	0 a 2
	16	Consideração da Confiabilidade e Intermitência dos recursos energéticos	0 a 2
	17	Consideração do custo de geração, implantação, O&M, TIR, VPL e Vida Útil	0 a 2
	18	Consideração do domínio tecnológico dos recursos: Projeto, Logística, Tecnologia e Equipamentos	0 a 2
	19	Consideração da facilidade técnica de implantação dos recursos	0 a 2
	20	Consideração na qualidade de energia dos recursos energéticos	0 a 2

Tabela 1 –Estrutura de valoração do critério Institucional

Os critérios para valoração estão apresentados na Tabela 2:

Consideração dos planos preferenciais	Valoração
Não considera na elaboração do plano preferencial	0,0
Discorre sobre o assunto no plano preferencial	0,5
Recomenda estudo específico no plano preferencial	1,0
Analisa para o plano preferencial em questão	1,5
Considera na elaboração do plano preferencial	2,0

Tabela 2 – Fatores de avaliação dos planos preferenciais

### 1.2.2 Critérios para avaliação Não-Institucional

O levantamento e a qualificação de informações Não Institucionais, diferentemente dos dados Institucionais, têm uma gama de fontes mais ampla e diversificada nos diferentes meios de veiculação. No caso, o balizador para proceder ao seu aproveitamento e sistematizá-lo para as metas deste trabalho foi a verificação de serem confiáveis. As principais fontes têm como alicerce a chancela de órgãos e listagens internacionais reconhecidas (inclusive pela entidade e/ou órgão, quer comercial ou não), como o *The World Factbook* (publicação da CIA, inclusive *on-line*), o relatório mundial do PNUD, a biblioteca da OCDE, os dados do Banco Mundial, além de certos creditados e veiculados, via Portais na *internet*, pelos próprios governos nacionais quando necessário (para preencher, por exemplo, o critério que considera a existência de um ministério do meio ambiente ou algo do gênero). O tratamento e a sistematização dos dados levantados conduzem ao preenchimento sistêmico e analítico de critérios, que contém a possibilidade de uma valoração qualitativa-quantitativa, levada à notação escalar simples, como se observa na Tabela 3.

Dimensão	Critério	Indicador	Valoração
Ambiental	1	Signatário ou não do Protocolo de Quioto	0 a 2
	2	Existência de ministério dedicado ao meio ambiente	0 a 2
	3	Consideração da porcentagem de energia elétrica oriunda de fonte renovável	0 a 2
	4	Emissão de CO <sub>2</sub> advinda do consumo de energia <i>per capita</i>	0 a 2
	5	Consideração da porcentagem da capacidade instalada de fontes renováveis	0 a 2
Política	6	Consideração da existência de comércio de energia elétrica com outros países	0 a 2
	7	Existência de um órgão regulador da energia elétrica no país	0 a 2
	8	Existência de uma ou mais leis regentes do sistema elétrico	0 a 2
	9	Existência de menção a planejamento energético na constituição	0 a 2
	10	Consideração sobre a participação em associações internacionais	0 a 2

Social	11	Consideração do IDH	0 a 2
	12	Consideração da porcentagem de casas/famílias/pessoas sem acesso à energia elétrica	0 a 2
	13	Consideração da taxa de desemprego do país	0 a 2
	14	Consideração da participação na OMC	0 a 2
	15	Consideração da porcentagem de urbanização do país	0 a 2
Técnico-E-conômica	16	Consideração do PIB per capita do país	0 a 2
	17	Consideração da dívida externa	0 a 2
	18	Consideração da produção de energia per capita	0 a 2
	19	Existência de ministério dedicado à pesquisa e desenvolvimento (ou outros ministérios que, combinados, exerçam essa função)	0 a 2
	20	Consideração da taxa de inflação	0 a 2

Tabela 3 – Estrutura de valoração do critério Não Institucional

No caso Não Institucional, a valoração considera-se da seguinte maneira: para efeitos de valoração (quantitativa e qualitativa), mantendo a metodologia original de normalização para valores escalares simples, o país com melhor desempenho para determinado critério (por exemplo, quando o critério é comparativo) recebe por definição o valor escalar 2, e os outros recebem proporcionalmente.

## 2 | DESEMPENHO GRUPAL DAS NAÇÕES NAS DIMENSÕES DE ANÁLISE

A análise é realizada através da comparação dos resultados em cada dimensão representados por gráficos nas vertentes: Institucional e Não Institucional. Destaca-se que, entre os grupos, o valor numérico absoluto não é relevante, mas sim os valores relativos.

### 2.1 Dimensão Ambiental

A representação gráfica dos resultados obtidos nas análises referentes à dimensão ambiental se encontra na Figura 1 e 2.

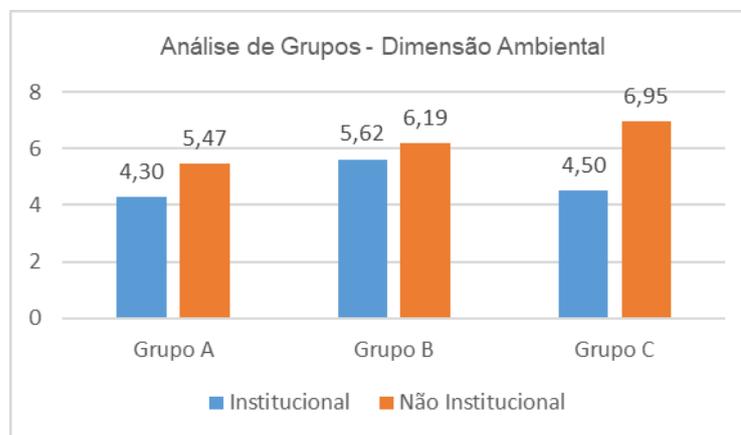


FIGURA 1 – Análise dos grupos na dimensão Ambiental

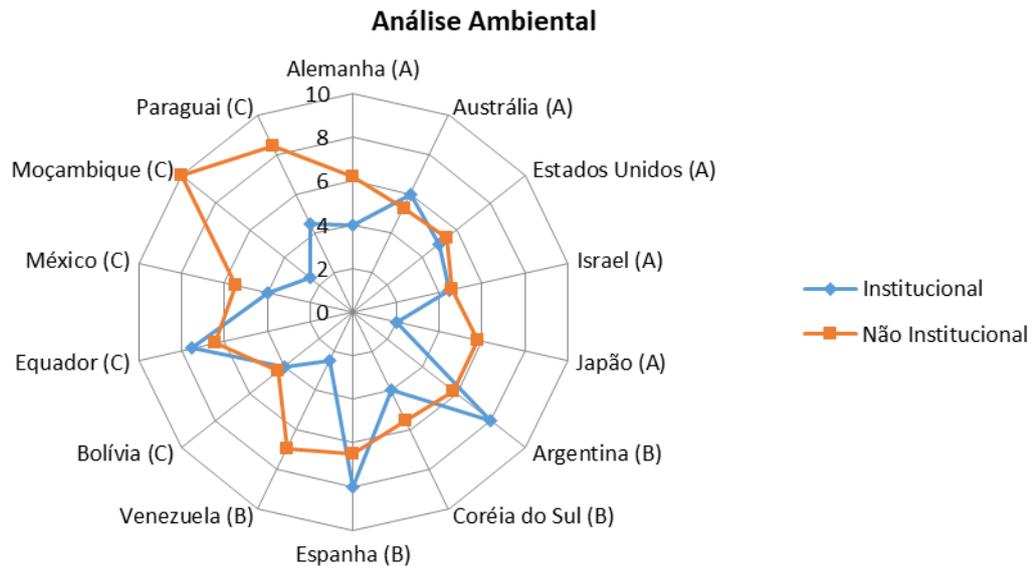


FIGURA 2 – Análise dos países na dimensão Ambiental

Institucionalmente, o grupo B apresenta o resultado mais elevado, o que indica que, no geral, para os países desse grupo, a preocupação ambiental figura de forma mais significativa nos planos estratégicos energéticos desses países, cenário esse compatível com a situação sócio-política dos países examinados. A análise Não-Institucional, como esperado, demonstra um resultado inferior para os países do grupo A, intermediário para o grupo B e superior para o grupo C, refletindo o padrão de consumo e vida desses países. A relação de complementaridade demonstrada entre a valoração Institucional e Não-Institucional que se mostra mais explicitamente nos resultados do grupo C indica um planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável, uma vez que o grupo não destaca no planejamento uma dimensão na qual já é eficiente. No grupo B apresenta-se uma ponderação que também indica um planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável, uma vez que o grupo apresenta resultados proporcionalmente inferiores no âmbito Não-Institucional e superior no Institucional. No grupo A, no entanto, nota-se o pior desempenho em ambos os âmbitos, demonstrando uma forte relação com o planejamento estratégico tradicional no quesito ambiental.

### 2.3 Dimensão Política

A representação gráfica dos resultados das análises referentes à dimensão política se encontra na Figura 3 e 4.

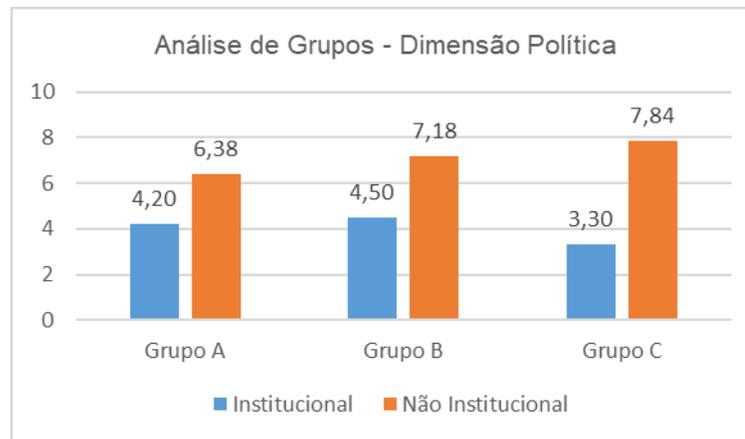


FIGURA 3 – Análise dos grupos na dimensão Política

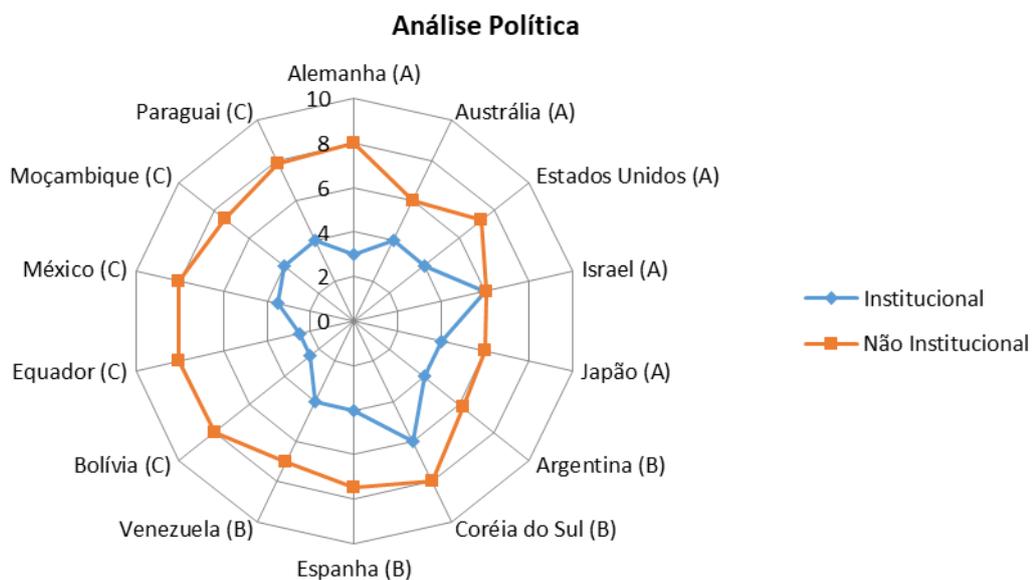


FIGURA 4 – Análise dos grupos na dimensão Política

Os resultados do grupo A apresenta a menor valoração Não-Institucional ao passo que o grupo C apresenta a maior valoração. Isso reflete, principalmente, o poder intervencionista do Estado nesses países. Os governos dos países do grupo A tendem a apresentar Estados menores e políticas menos influentes no que tange ao setor elétrico/energético, situação oposta ao que ocorre nos países do grupo C. Nota-se que, para a manutenção dessas políticas é necessário, em países como os do grupo A, o estabelecimento de diretrizes básicas a serem seguidas pelos atores independentes do Estado, situação oposta do que ocorre em países como os do grupo C, onde o estabelecimento de diretrizes não é necessária vir no próprio Planejamento Estratégico (devido ao poder de intervenção do Estado). A complementaridade se demonstra em todos os grupos na dimensão política, demonstrando um planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável.

## 2.4 Dimensão Social

A representação gráfica dos resultados referentes à dimensão social se encontram na Figura 5 e 6.

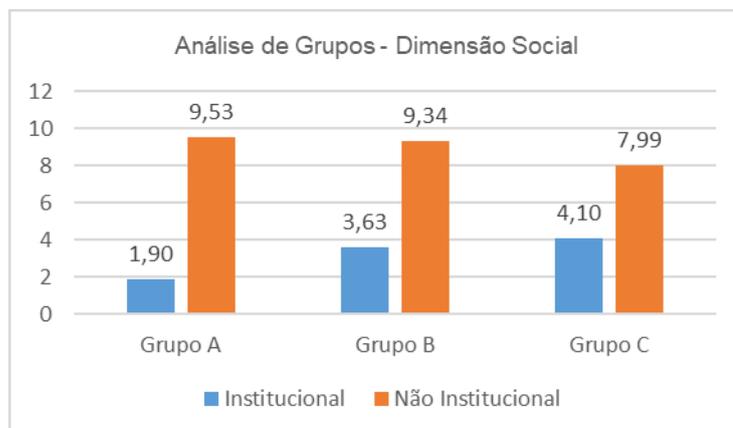


FIGURA 5 – Análise dos grupos na dimensão Social

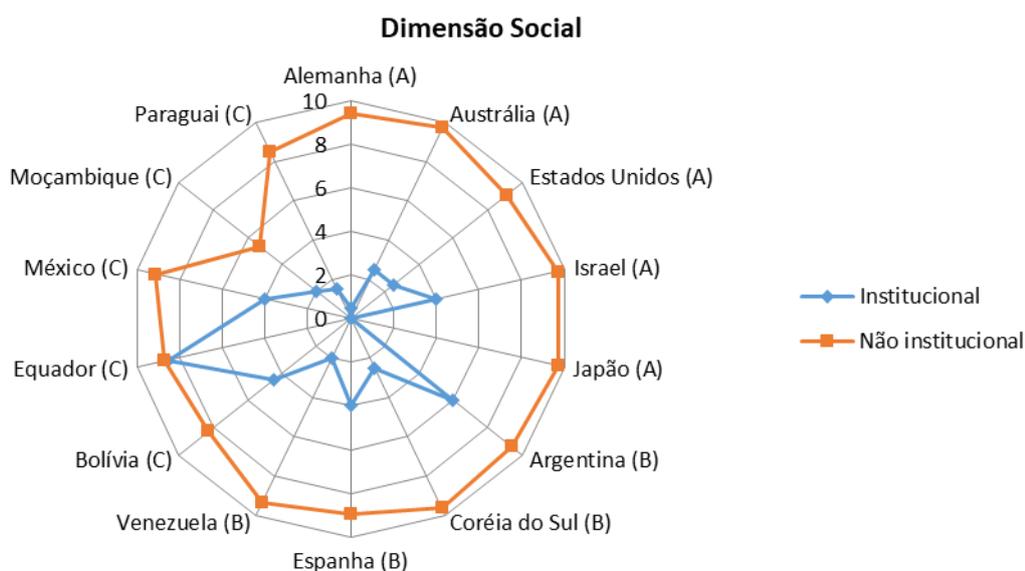


FIGURA 6 – Análise dos grupos na dimensão Social

Os maiores indicadores sociais Não-Institucionais são apresentados pelo grupo A e os menores pelo grupo C, a recíproca ocorre nos indicadores Institucionais e, em ambos os âmbitos, o grupo B ocupa um patamar intermediário. O resultado dos indicadores Não-Institucional era esperado, porém o resultado apresentado pelos indicadores Institucionais demonstra de forma bastante explícita a relação de complementaridade de um planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável em todos os grupos.

## 2.5 Dimensão Técnico-Econômica

A representação gráfica das análises da dimensão técnico-econômica se mostram

através da Figura 7 e 8.

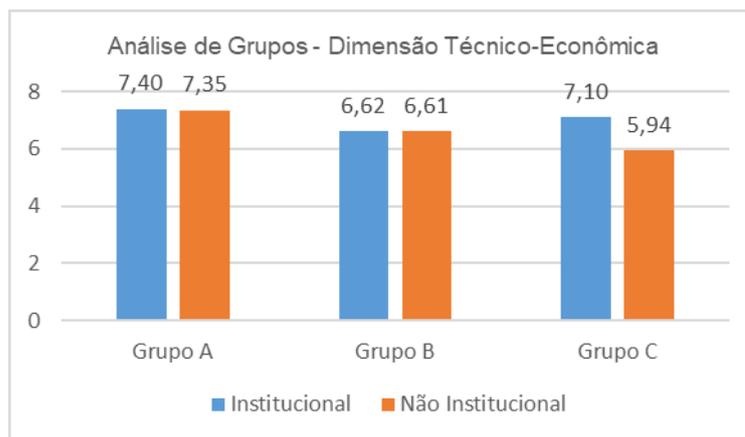


FIGURA 7 – Análise dos grupos na dimensão Técnico-Econômica

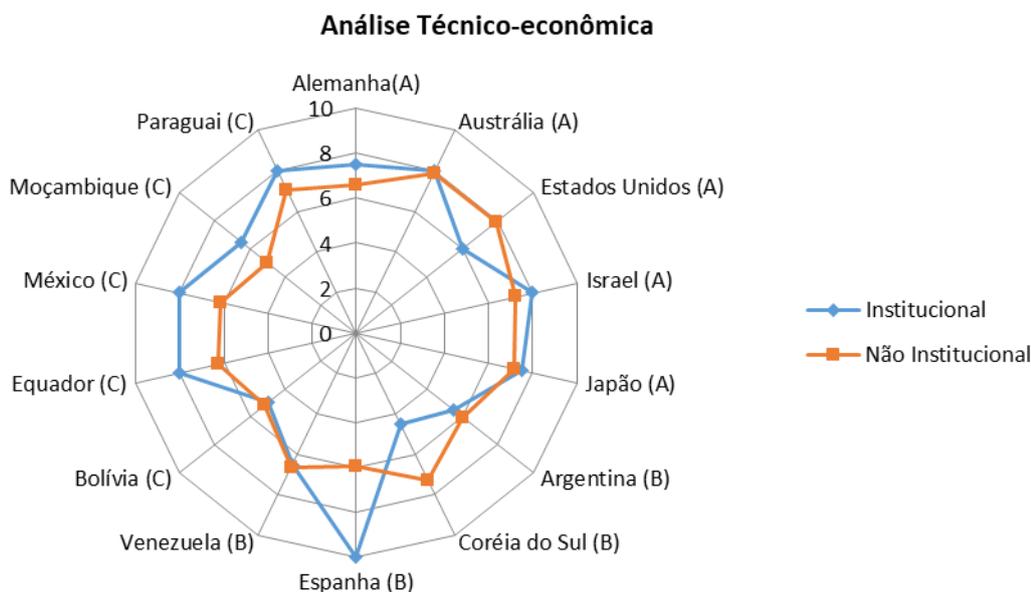


FIGURA 8 – Análise dos países na dimensão Técnico-Econômica

O grupo A apresenta os maiores indicadores técnico-econômicos Não Institucionais e o grupo C os menores. Ainda, nos grupos B e C ocorre a complementaridade indicativa de planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável. No entanto, nota-se, no grupo A, um forte enfoque na dimensão técnico-econômica mesmo sendo este o grupo com os melhores indicadores na área, demonstrando uma forte relação do grupo com o planejamento estratégico tradicional.

### 3 | SISTEMATIZAÇÃO E DIAGNÓSTICO DENTRO DAS DIMENSÕES DO DESENVOLVIMENTO

Uma vez avaliado o desempenho dos grupos analisando de forma comparativa entre grupos com possibilidades da verificação da aplicação de um planejamento estratégico

direcionado ao desenvolvimento sustentável em cada uma das dimensões, neste item os grupos são avaliados internamente nas suas vertentes. Os resultados se normalizam tal como a seguir: todos os resultados são multiplicados por uma constante adequada de forma que todas as valorações estejam contidas entre 0 e 10. Os maiores resultados em ambos os âmbitos, Institucional e Não-Institucional, tem o valor 10 e os outros um valor proporcionalmente menor.

### 3.1 Grupo A

A síntese de resultados do grupo A se encontra na Figura 5.

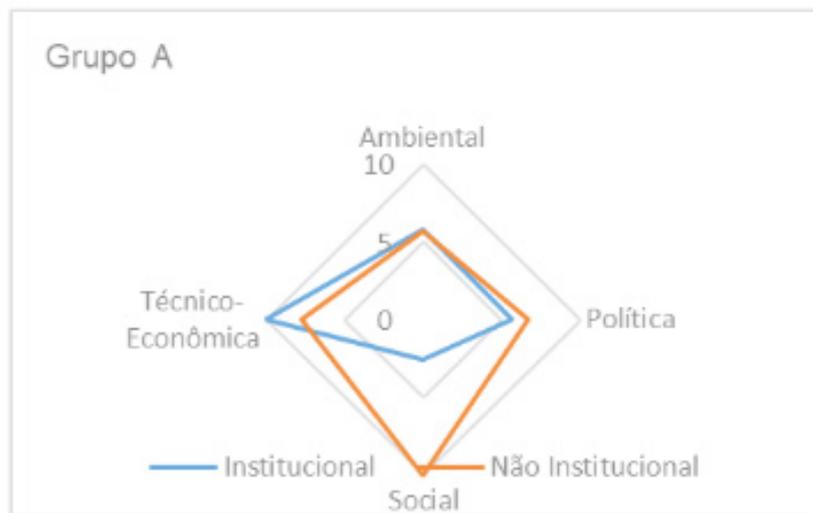


Figura 5 – Síntese dos resultados do grupo A

O grupo A apresenta resultado equilibrado em todas as dimensões que não a dimensão técnico-econômica, demonstrando uma forte relação com o planejamento energético tradicional. No entanto, é importante notar a importância dada ao parâmetro ambiental no âmbito Institucional, o que apresenta uma quebra com o planejamento tradicional que, dada a característica intrínseca deste grupo de países, tanto econômica quanto política e social e, não menos importante, culturalmente, torna-se ainda mais positiva.

### 3.2 Grupo B

A síntese de resultados do grupo B podem ser observados claramente na Figura 6.

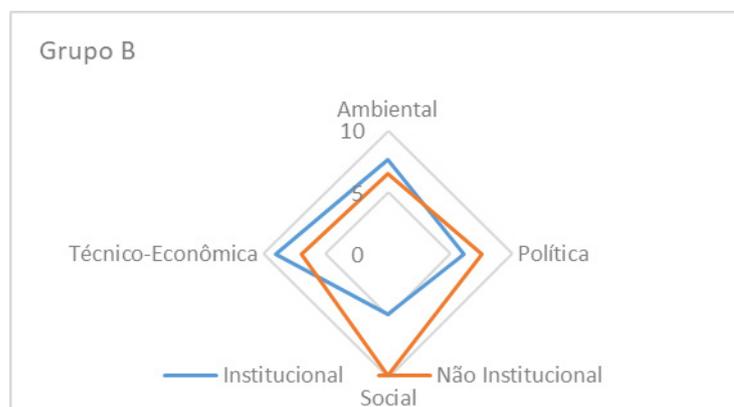


Figura 6 – Síntese dos resultados do grupo B

O planejamento estratégico do grupo B é bastante equilibrado, porém, ainda assim, nota-se uma tendência em favor da dimensão técnico-econômica, ainda que menor que no grupo A. É importante mencionar que o grupo em questão, em ambos os âmbitos, apresenta um bom desempenho no quesito ambiental, demonstrando uma quebra importante com o planejamento tradicional.

### 3.3 Grupo C

A síntese de resultados do grupo C se encontra na Figura 7.

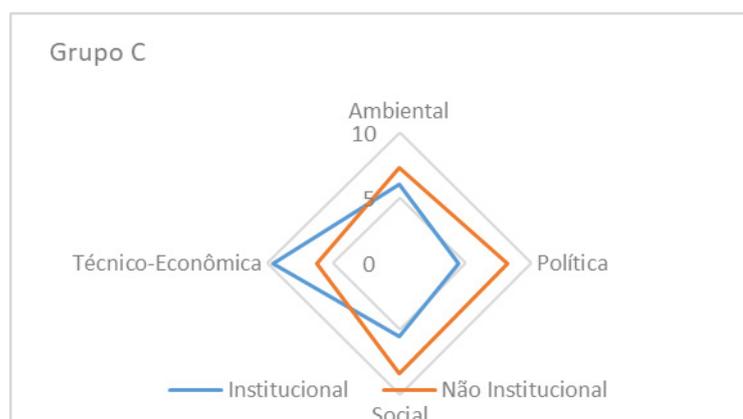


Figura 7 – Síntese dos resultados do grupo C

Assim como o grupo B, o grupo C apresenta um planejamento bastante equilibrado. Na dimensão técnico-econômico Institucional o grupo apresenta uma valoração elevada, porém, dado o seu baixo desempenho relativo no mesmo quesito no âmbito Não-Institucional, isso não representa uma tendência ao planejamento tradicional. Em razão disso, pode-se dizer que o grupo C é o que apresenta planejamentos estratégicos mais direcionados ao desenvolvimento sustentável dentre os três.

## 4 | CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados sinalizam que os três grupos de países analisados amostralmente, testemunham, relativamente, ao conteúdo do desenvolvimento sustentável do setor elétrico no

mundo. Estes apresentam condições consideráveis de planejamento energético sustentável, ou seja, apresentam condições para a aplicabilidade de uma metodologia que considere os impactos nas diversas dimensões: ambiental, social, político e técnico-econômico, que são as dimensões de sustentação do planejamento integrado de recursos energéticos, o PIR (como definido em UDAETA, 2012). Este planejamento que busca um mínimo custo completo não está relacionado a um único custo efetivo momentâneo, pois depende de uma série de combinações e decisões. Ou seja, o custo mínimo para uma empresa talvez não seja o custo mínimo para a sociedade, ou vice-versa.

O conceito de custo mínimo estará distribuído ao longo do horizonte de planejamento, o que pode ocasionar que um mínimo custo momentâneo não necessariamente reflita o menor custo absoluto no processo completo. Nesse sentido a avaliação completa corresponde a um balanço equilibrado de interesses competitivos, entre todos os envolvidos e interessados no processo, no horizonte de planejamento.

Nesse sentido, conclui-se que em uma escala mundial, há um grande esforço para a evolução técnico-econômica e ambiental, porém em ordem muito menor para os quesitos sociais e políticos. Posto que a forte presença do parâmetro ambiental já demonstra a maior preocupação com o planejamento integrado (embora que não o PIR) e leve quebra com o modelo tradicional de planejamento.

Ainda, nota-se que os planos energéticos refletem em muito a situação econômico-social do país do qual é oriundo. De modo geral, os países tidos como desenvolvidos tendem a enfatizar em seus planos os aspectos ambientais e técnico-econômicos, ao passo que os países emergentes tendem a priorizar os aspectos ambientais, técnico-econômicos e também os sociais.

Assim, por exemplo, uma comparação entre Alemanha e Equador, na Alemanha a dimensão social é praticamente não citada, e o ambiental, tratado com generalidade (porém, não com descaso). Já no Equador, ao social foi dada a maior importância, demonstrando um Estado atuante e preocupado com o bem-estar da sociedade, uma política adotada fortemente nos países sul-americanos. De todo modo cabe ressaltar que naturalmente um país desenvolvido tem conteúdo social já incrustado no dia a dia, ao passo que um país em desenvolvimento necessita de fato se dedicar a nesse quesito por definição de desenvolvimento de um estado moderno.

Em uma escala mundial, há um grande esforço para a evolução técnico-econômica e ambiental, porém em ordem muito menor para as dimensões sociais e políticas. Isso demonstra uma forte remanescência do planejamento tradicional de recursos, que visa apenas o custo benefício financeiro direto, situação menos alarmante nos países cujos indicadores econômicos são menos elevados, pois, mesmo dentro do desenvolvimento sustentável, o desenvolvimento técnico-econômico, para esses países, é uma prioridade incontestável. Nota-se então, uma tendência mundial da realização de planejamentos estratégicos mais focados no desenvolvimento sustentável, porém sempre priorizado pelo aspecto técnico-econômico. Há, porém a possibilidade da aplicação de um planejamento direcionado ao desenvolvimento sustentável, no entanto, isso requereria uma mudança no posicionamento

político dos países em posições relevantes no âmbito político-econômico e a colaboração de países menos influentes.

Enfim, como consideração final, a partir dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se enfatizar que a elaboração de um planejamento energético com bases no desenvolvimento sustentável (PIRnaUSP pela sigla definida em UDAETA, 2012), principalmente para os países em desenvolvimento, contribuirá intensamente para o uso racional e também eficiente de recursos energéticos, para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico, da renovação e da ampliação do parque gerador e modo de consumo, para a identificação das políticas públicas setoriais, eficiência ambiental, abranger a inclusão efetiva dos interessado -envolvidos no processo; e, essencialmente, para uma avaliação de planejamento continuada, nos mínimos custos completos nas dimensões consideradas pelo PIR, em ações consoantes com o desenvolvimento sustentável.

## REFERÊNCIAS

- BAITELO, R. L. **Modelo de cômputo e valoração de potenciais completos de recursos energéticos para o planejamento integrado de recursos**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CICONE JR., D. **Modelagem e aplicação da avaliação de custos completos através do processo analítico hierárquico dentro do planejamento integrado de recursos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- EUCI. **The Utilities' Role in Engaging Stakeholders and Intervenors to Improve the IRP Process**. Conference. Scottsdale, AZ, 2013.
- GIMENES, A. L. V. **Modelo de Integração de Recursos como Instrumento para um Planejamento Energético Sustentável**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- HECO. Hawaiian Electric Company. **Integrated Resource Planning**. 2012.
- HU, Z. et al. **A Low-Carbon Electricity Model: Integrated Resource Strategic Planning and Its Application**. Power and Energy Society General Meeting, IEEE - State Grid Energy Res. Inst., Beijing, China, 2010.
- KANAYAMA, P. H. **Mecanismos de desenvolvimento limpo no planejamento integrado de recursos energéticos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- KINTO, O. T. **Metodologia para o PIR em ambiente corporativo para o recurso energético da gaseificação de biomassa**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- MARUYAMA, F. M. **Arquitetura do Plano Preferencial de Recursos para o setor elétrico no Planejamento Integrado de Recursos Energéticos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2013.
- RIGOLIN, P. H. C. **Desenvolvimento de um sistema para classificar recursos energéticos de oferta e demanda com base no cômputo e na valoração do potencial completo dos recursos energéticos dentro do planejamento integrado de recursos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

RTC/PIRnaUSP - N°455. UDAETA, M. E. M. et al. **Avaliação Completa de Planos Preferenciais do Setor Elétrico pelo Mundo dentro da Metodologia do Planejamento Integrado de Recursos Energéticos visando o Desenvolvimento Sustentável**. Relatório Técnico Científico. São Paulo, SP, 2014.

UDAETA, M. E. M. **Novos instrumentos de planejamento energético e o desenvolvimento sustentável - Planejamento Integrado de Recursos energéticos na USP**. Tese de Livre Docência. EPUSP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

UDAETA, M. E. M. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR para o Setor Elétrico – pensando o desenvolvimento sustentável**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

World Energy Council – WEC “**World Energy Resources 2013 Survey**”, ISBN: 978 0 946121 29 8, 2013.

## CONSTRUÇÃO DE TURBINA DE TESLA E VALIDAÇÃO DE MODELO TEÓRICO

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 05/02/2020

### **Lucas Vinicius Capistrano de Souza**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/0313736122054812>

### **Leonardo Haerter dos Santos**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/4601034162292080>

### **Jader Flores Schmidt**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/1562087493047738>

### **Moises da Silva Pereira**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/5172318513169413>

### **Agnaldo Rosso**

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/4424797943352801>

**RESUMO:** A crescente busca pela produção de energia elétrica a partir de fontes não esgotáveis, menos poluentes e de menor impacto ambiental trouxe à tona cenários que possibilitam o emprego de máquinas

geratrizes especiais, como a Turbina de Tesla. Neste trabalho é realizado o dimensionamento de uma Turbina de Tesla a partir do modelo teórico proposto por (COUTO H.S., 2006) e tratado no trabalho conduzido por (REMUS, 2011), projeto, construção e teste de uma Turbina do tipo de Tesla acionada por vapor d'água fornecido por uma caldeira à pressão de 5,9 bar, temperatura de 158 °C e vazão de m<sup>3</sup>/s, com o objetivo de validar o método teórico confrontando os resultados teóricos com os valores medidos em teste. No tocante ao projeto da turbina, a simplicidade mecânica e das peças e o pouco número de partes que a compõe contribui para que o modelamento tridimensional em CAD seja realizado com facilidade. Sobre a fabricação do protótipo, ressalta-se dois pontos: os discos que, por sua fina espessura, necessitam de um processo de corte especial (laser, plasma ou jato d'água) e o bocal injetor que acarreta certa complexidade devido a geometria interna. Mesmo tendo em conta o baixo rendimento do motor acoplado ao eixo da máquina para geração de energia, o baixo rendimento da caldeira, a falta de equipamento específico para medição de torque e a perda de carga global do sistema, obtém-se uma diferença de dezenas de vezes do valor de torque predito pelo

modelo teórico e o fornecido pelos testes, para estas condições. Estes valores, assim como a inconsistência do método exposta, corroboram a conclusão de que o referido modelo de predição avaliado não funciona de maneira confiável ou previsível.

**PALAVRAS-CHAVE:** Turbina de Tesla, geração, cogeração, rendimento.

## TESLA TURBINE CONSTRUCTION AND THEORETICAL MODEL VALIDATION

**ABSTRACT:** The growing search for the production of electricity from non-exhaustible, less polluting and less environmental impact sources, has brought to light scenarios that allow the use of special generating machines, such as the Tesla Turbine. In this work, is realized the sizing based on the theoretical model proposed by (COUTO HS, 2006) and treated in the work conducted by (REMUS, 2011), design, construction and testing of a Tesla-type Turbine driven by water vapor supplied by a boiler at a pressure of 5.9 bar, a temperature of 158 ° C and a flow rate of , in order to validate the theoretical method confronting the theoretical results with the values measured in test. With regard to the design of the turbine, the mechanical and parts simplicity and the small number of parts that compose it contribute to the three-dimensional modeling in CAD to be carried out with ease. Regarding the manufacture of the prototype, two points stand out: the discs, which, due to their thin thickness, need a special cutting process (laser, plasma or water jet) and the injector nozzle that causes some complexity due to the internal geometry. Even taking into account the low performance of the motor coupled to the machine shaft for power generation, the low efficiency of the boiler, the lack of specific equipment for torque measurement, the global loss of the system, is obtained a difference of dozens of times the torque value predicted by the theoretical model over the one provided by the tests, for these conditions. These values, as well as the exposed method inconsistency, corroborate the conclusion that the referred prediction model evaluated does not work in a reliable or predictable way.

**KEYWORDS:** Tesla Turbine, generation, cogeneration, efficiency.

## INTRODUÇÃO

Dentre os ramos da problemática energética que se observa atualmente, um deles é a falta de abastecimento de energia elétrica em propriedades rurais ou afastadas de grandes centros, ou mesmo em países cuja infraestrutura é precária. Em números, registros publicados em maio de 2019 pelo Banco Mundial, mais de 10% da população mundial não possui acesso à energia elétrica, sendo a maior concentração desta ocorrência na região da África Subsaariana (G1, 2019).

Outro detalhe é que, segundo um levantamento conduzido sobre as matrizes energéticas mundiais, ainda hoje a fonte mais comum nos processos de geração de energia são o petróleo, o carvão mineral e o gás natural (EPE, 2018) (REDAÇÃO, 2017), que além de estarem se esgotando, contribuem para a deterioração da qualidade dos recursos naturais necessários à vida humana.

A busca por novos meios de obtenção e aproveitamento de energia vem crescendo

exponencialmente nos últimos quinze anos e, com isso, também a ressurgência de ideias antigas que por várias razões, dentre elas, a falta de aplicabilidade ou necessidade existente à época, foram deixadas de lado.

Existem vários tipos de máquinas capazes de converter energia cinética de um fluido em energia mecânica, ou energia mecânica em energia cinética em um fluido, cuja utilização data de milhares de anos, empregadas por exemplo, em sistemas de irrigação e rodas hidráulicas pelos povos da Mesopotâmia e Roma antiga respectivamente (HENN, 2006).

Entra em cena então uma geratriz, nomeada Turbina de Tesla, cuja principal vantagem é a simplicidade de projeto quando comparada com as demais máquinas de fluido rotativas aplicadas em geração de energia elétrica. Por exemplo, sua montagem e manutenção possui tamanha facilidade que para realizá-los, não há necessidade de mão de obra especializada. Uma pessoa comum poderia operar tais tarefas com facilidade sem risco de danos ao equipamento por falta de conhecimento profundo (COURAS, 2009).

Outro fato que a coloca à frente das turbinas convencionais é a capacidade de ser aplicada em sistemas de cogeração de energia podendo trabalhar com gases provenientes combustão, biomassa, fluidos bifásicos, energia geotérmica e até mesmo contendo partículas abrasivas sem que isto cause prejuízo à máquina, devido ao seu princípio de funcionamento que a permite operar sob condições adversas (SENGUPTA & GUHA, 2012). Por esta e outras razões os estudos sobre a Turbina de Tesla vêm se popularizando, impulsionados pela busca por alternativas viáveis de cogeração de energia elétrica por meios mais limpos, sustentáveis e menos agressivo ao meio ambiente.

A partir do cenário supra exposto, o presente trabalho se desenvolve com o propósito de dimensionar, projetar, construir e testar um protótipo de Turbina de Tesla e validar o método teórico usado para concebê-la e a partir deste resultado, avaliar sua viabilidade de emprego em sistemas de cogeração e geração descentralizada de energia elétrica como um serviço de fornecimento auxiliar (a exemplo das placas fotovoltaicas) em centros urbanos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Turbina de Tesla tem como principal característica, que a diferencia dos demais tipos de máquinas de fluido geratrizes, o seu princípio de funcionamento, que utiliza a transferência de energia cinética do fluido de trabalho para os discos da turbina através dos efeitos da adesividade e viscosidade aerodinâmica (REMUS, 2011). Tal peculiaridade a torna uma máquina sem igual e que pode ser utilizada em condições onde nenhuma outra geratriz poderia (CAIRNS, 2003).

Basicamente, seu funcionamento se dá com a injeção de um fluido sobre um rotor composto de múltiplos discos acoplados a um eixo paralelamente, de tal maneira que o fluxo atinja o montante de discos tangencialmente. Assim, estando este rotor enclausurado, o fluido será forçado a escoar por entre os discos para chegar até as aberturas do sistema de descarga posicionado próximo ao eixo, na base dos discos (MANFRIDA, PACINI, &

TALLURI, 2017).

Há pouco mais de um século esta máquina não era sequer conhecida, mas graças aos esforços e trabalhos de desenvolvimento de Nikola Tesla, renomado inventor conhecido por suas contribuições no campo da eletricidade, este equipamento ganhou cena e aos poucos teve a atenção de estudiosos que a investigaram a fim de desvendar as características físicas e os fenômenos fluidodinâmicos que regem seu funcionamento (SENGUPTA & GUHA, 2012). Na Figura 1 é visto a patente original de Tesla.

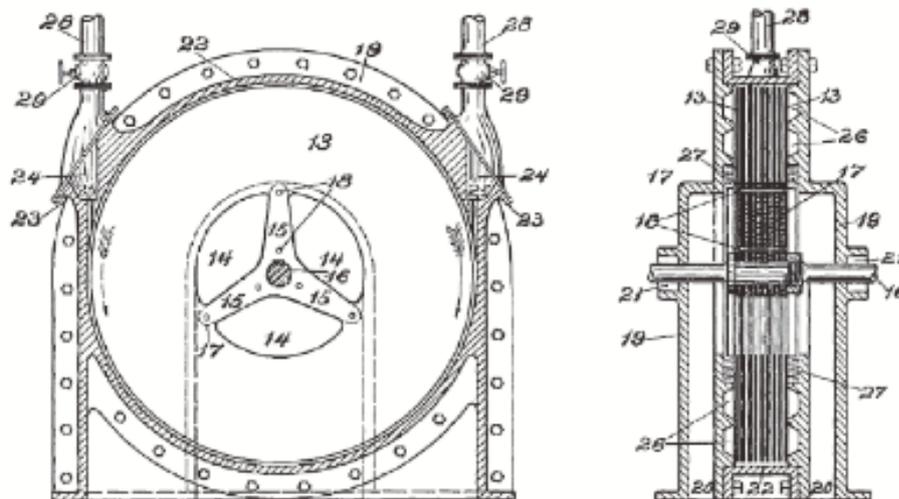


Figura 1: Desenho descritivo para patente da turbina de Tesla (Fonte: TESLA, N. Turbine. U. S. Patent Nº 1.061.206, 1913).

No que diz respeito às pesquisas, o alvo mais frequente dos estudos sobre a Turbina de Tesla, também conhecida como turbina de discos, são os influenciadores do rendimento tanto dos componentes isoladamente quanto global da máquina. Este dado está vinculado a muitas variáveis, que vão desde a temperatura do fluido de trabalho, tipo de fluido, até as geometrias do bocal de injeção, rotor, carcaça da turbina e sistema de descarga. Como sabido, o rendimento de uma máquina é de grande valia uma vez que é o parâmetro o qual pode definir quão viável é tal equipamento. Portanto, além dos diferentes métodos de cálculos propostos, alterações de geometria ou arranjo dos componentes estão sempre presentes nos trabalhos sobre turbina de discos, podendo ainda alguns fazerem sugestões atípicas como aplicação de ciclos térmicos especiais (caso do Ciclo Rankine Orgânico) (MANFRIDA, PACINI, & TALLURI, 2017) com o intuito de aumentar seu rendimento.

Na análise dos fenômenos internos da Turbina de Tesla, grande parte dos estudos sobre ela levam em consideração um gás ideal sob escoamento incompressível, em regime subsônico, com propriedades constantes e ausência de transferência de energia térmica, tornando o método de cálculo dos campos de escoamento simplificado (K.E. BOYD, 1968) (DEAM R.T., 2008) (SENGUPTA & GUHA, 2012). Porém, estas simplificações requerem atenção uma vez que podem culminar na super ou subestimação do potencial real da turbina.

Outro detalhe essencial é identificar o tipo de regime do escoamento interno predominante

(laminar ou turbulento) na turbina para que sejam aplicadas as equações corretas, pois quando o escoamento acontece em regime turbulento, por exemplo, pode ocorrer recirculação e, uma vez que as equações simplificadas (polinomiais pseudo-parabólicas geralmente utilizadas) não são aplicáveis para recirculação, sua influência acaba por não ser detalhada nos cálculos (SENGUPTA & GUHA, 2012).

Vale lembrar que o principal fator que influencia a definição do regime de escoamento da máquina é o espaço entre os discos (COUTO H.S., 2006), de maneira que na fase de projeto, obtido os valores correspondentes à espessura da camada limite e à potência gerada para cada regime de escoamento, escolhe-se qual será predominante no sistema.

Um detalhe importante é que com escoamento laminar, a rendimento do rotor pode atingir pelo menos 95% (RICE, 1991). Isso acontece às custas de aumentar a quantidade de discos e diminuir a vazão, o que resulta em um rotor maior. Para cada vazão existe um número de Reynolds otimizado para máxima eficiência. Com fluidos comuns, o espaço requerido entre os discos é drasticamente pequeno fazendo com que o fluxo laminar torne o rotor grande e pesado para uma taxa de vazão prescrita (RICE, 1991).

O método aplicado ao presente trabalho proposto por (COUTO H.S., 2006) tem como finalidade apenas a de prever o número de discos necessários para desenvolver a potência para realizar um trabalho prescrito (COUTO H.S., 2006). Como já mencionado, o uso de um método cujas equações não contemplam os fenômenos os quais influenciam o comportamento desta turbina (medidos e classificados pela ordem de magnitude) podem causar discrepâncias entre o resultado teórico e o real e, por tal motivo, este trabalho foi conduzido, para conhecer a proximidade entre os modelos teórico e real. Além do que, segundo (GUHA & SENGUPTA, 2012) e pesquisas correntes para elaboração deste artigo, não há registros encontrados de outros autores confrontando o método a partir de experimentação prática.

O presente trabalho deve ser considerado consequente do conteúdo teórico apresentado por (REMUS, 2011) e, portanto, o desenvolvimento matemático das equações aqui empregadas, porém não detalhadas, é nele encontrado.

## DESENVOLVIMENTO

Não há necessariamente uma sequência a ser seguida no dimensionamento, mas por convenção o projeto se inicia pelos componentes de entrada da turbina, seguindo como ordem os demais no caminho do fluido.

A obtenção das equações aqui aplicadas é encontrada no trabalho tido como base conduzido por (REMUS, 2011), título disponível nas referências bibliográficas.

Primeiramente, calcula-se as propriedades do fluido de trabalho na saída do bocal injetor.

Pressão:

$$p = \frac{597,82}{\left[1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2\right]^{(1,385-1)}} = 317,29 \text{ kPa}$$

Temperatura:

$$T = \frac{432,15}{1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2} = 362,23 \text{ K}$$

Massa específica:

$$\rho = \frac{3,17}{\left[1 + \frac{1,385-1}{2} \cdot 1^2\right]^{\frac{1,385}{(1,385-1)}}} = 1,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

A área do bocal de injeção foi dimensionada a partir do diâmetro hidráulico do tubo de saída de vapor da caldeira, preservando esta medida a fim de diminuir a perda de carga no escoamento, totalizando  $4,12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Findada esta parte, é possível obter os valores referente a camada limite e quantidade de discos que comporá o rotor.

Espessura da camada limite laminar:

$$\delta_{D \text{ laminar}} = 5,48 \cdot \left(\frac{27,26 \cdot 10^{-6}}{902,68}\right)^{\frac{1}{2}} = 9,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Espessura da camada limite turbulenta:

$$\delta_{D \text{ turbulento}} = 0,376 \cdot \left(\frac{0,125 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6}}{902,68}\right)^{\frac{1}{2}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Área molhada:

$$Ua(\mathbf{n} - 1) = \frac{14,55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,68 \cdot 0,25} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Quantidade de discos:

$$\mathbf{n} = \frac{14,55 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,68 \cdot 0,25 \cdot 27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} + 1 = 1,2$$

Devido ao valor não inteiro fornecido pela equação, busca-se geralmente o valor maior mais próximo. Neste caso será considerado três discos. Para tal, se faz necessário recalcular o valor do número de Reynolds, que será então de  $Re = 202,07$ .

A seguir é calculado a magnitude do torque, vazão e potência teóricos gerados pela turbina.

Para o regime laminar, os valores máximos de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{lmax} = 1,77 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^3 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 902,68)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 5,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{lmax} = 0,616 \cdot \pi \cdot 1,66 \cdot 0,125^4 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 902,68^3)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 0,34 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{lmax} = 0,34 \cdot 902,68 = 304,66 \text{ W}$$

Para o regime laminar, os valores médios de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{lmed} = 1,77 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^3 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{lmed} = 0,616 \cdot \pi \cdot 1,68 \cdot 0,125^4 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^3)^{\frac{1}{2}} \cdot 3 = 0,12 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{lmed} = 0,12 \cdot 451,34 = 53,86 \text{ W}$$

Para o regime turbulento, os valores máximos de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{tmed} = 0,438(27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^4 \cdot 0,125^{13})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{tmed} = 0,073 \cdot 1,68 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^9 \cdot 0,125^{23})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 0,19 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{tmed} = 0,19 \cdot 451,34 = 85,48 \text{ W}$$

Para o regime turbulento, os valores médios de:

Vazão volumétrica:

$$Q_{tmed} = 0,438(27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^4 \cdot 0,125^{13})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Torque:

$$T_{tmed} = 0,073 \cdot 1,68 \cdot (27,26 \cdot 10^{-6} \cdot 451,34^9 \cdot 0,125^{23})^{\frac{1}{5}} \cdot 3 = 0,19 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Potência:

$$P_{tmed} = 0,19 \cdot 451,34 = 85,48 \text{ W}$$

Conhecendo a magnitude das forças atuantes no sistema, pode-se então realizar a verificação de segurança dos componentes para construção.

O material utilizado para os discos foi um aço SAE1045. As propriedades do metal empregado no protótipo são encontradas no livro base para cálculo estrutural, (SHIGLEY, 1984), contido nas referências bibliográficas.

Tensão tangencial nos discos:

$$\sigma_t = \frac{7860 \cdot 1047^2}{4} \cdot [(3 + 0,30) \cdot 0,125^2 + (1 - 0,30) \cdot 0,0375^2] = 113,12 \text{ MPa}$$

Tensão radial:

$$\sigma_r = \frac{3+0,30}{8} \cdot 7860 \cdot 1047^2 \cdot (0,125 - 0,0375) = 27,19 \text{ MPa}$$

Tensão de ruptura no plano diametral:

$$\sigma_a = \frac{7860 \cdot 1047 \cdot (0,125^3 - 0,0375^3)}{(3 \cdot 0,125 - 0,0375)} = 4,29 \text{ MPa}$$

Com estes valores é possível obter a espessura mínima de cada disco.

$$e = \frac{0,66}{248,2 \cdot 10^6 \cdot 0,125 \cdot (0,125 - 0,0375) \cdot 3} = 8,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

Devido ao valor ser pequeno tal que impossibilite a construção dos discos, uma espessura de 1,05 mm é considerada e utilizada para fabricação. É importante ressaltar que apesar desta alteração ser assumida por questões construtivas, a mesma não possui influencia alguma sobre o sistema.

Por fim, baseando-se no método de Soderberg, dimensiona-se o eixo e a chaveta do

rotor, respectivamente.

$$D_e = \left\{ \frac{32 \cdot 2}{\pi} \cdot \left[ \left( \frac{0}{S_e} \right)^2 + \left( \frac{0,66}{295 \cdot 10^6} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Devido a limitação imposta pelas dimensões dos rolamentos utilizados no protótipo, o diâmetro menor do eixo será de  $8 \cdot 10^{-3}$  m.

$$L = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,66}{0,012^2 \cdot 310 \cdot 10^6} = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Como o diâmetro interno dos discos são diferentes do diâmetro interno dos rolamentos, isto é, igual a 12 mm, o valor utilizado para o cálculo da chaveta foi este de 12 mm, pois é onde ela será instalada. Como o torque produzido pela turbina é baixo, o comprimento da chaveta, por consequência, será também pequeno. Assim, é construída uma chaveta especial para o protótipo nas dimensões 3x3x16,55 mm (valores de lado, altura e comprimento, respectivamente).

A estrutura externa (invólucro da turbina), formado pelo anel e as chapas metálicas laterais não se fazem passíveis de verificação, uma vez que estarão sob condição de esforço, carregamento e temperatura desprezíveis às suas dimensões e propriedades mecânicas.

## CONSTRUÇÃO E TESTE

Completa a fase de projeto do modelo, a construção se iniciou trabalhando os materiais brutos adquiridos. O anel invólucro, parte mais onerosa em tempo devido à sua dimensão e aos defeitos de forma, foi feito a partir de um tubo metálico comercial que passou por um processo de usinagem nos laboratórios da Universidade, e igualmente as tampas laterais.

A escolha pelos componentes em aço se deu pelo valor de aquisição, bastante inferior a outros como alumínio ou ligas especiais. Esta decisão acarretou certa dificuldade durante o processo de fabricação do protótipo pela massa elevada dos componentes e as suas dimensões e geometrias que estavam no limite do suportado pelas máquinas disponíveis.

Os discos, por serem muito finos, o que facilita que durante sua fabricação sejam avariados e empenados, foram doados por uma empresa especializada em corte a laser, junto com os espaçadores internos.

Um detalhe interessante são os rolamento utilizados na mancalização do eixo, que ao invés de serem de um tipo comercial aplicado ao uso em máquinas industriais, se trata de rolamentos especiais usados em skates e afins, os quais trabalham normalmente em rotações elevadas e condições ambientais severas, visto que em sua aplicação cotidiana estão sujeitos à poeira, detritos, líquidos e etc., e isto sem perder a capacidade de suportar carregamentos elevados. Ainda assim, pela simplicidade do equipamento, a massa a ser suportada por eles é desprezível se comparada à sua capacidade nominal.

O protótipo construído demorou algumas semanas até chegar ao estado da arte, pois não somente para este trabalho, foi pensado para ser modulável. Isto é, passível de alterações permitindo a continuidade do estudo, sendo de fácil montagem e desmontagem.

A Figura 2 mostra a forma final de cada componente e a Figura 3, o protótipo montado.

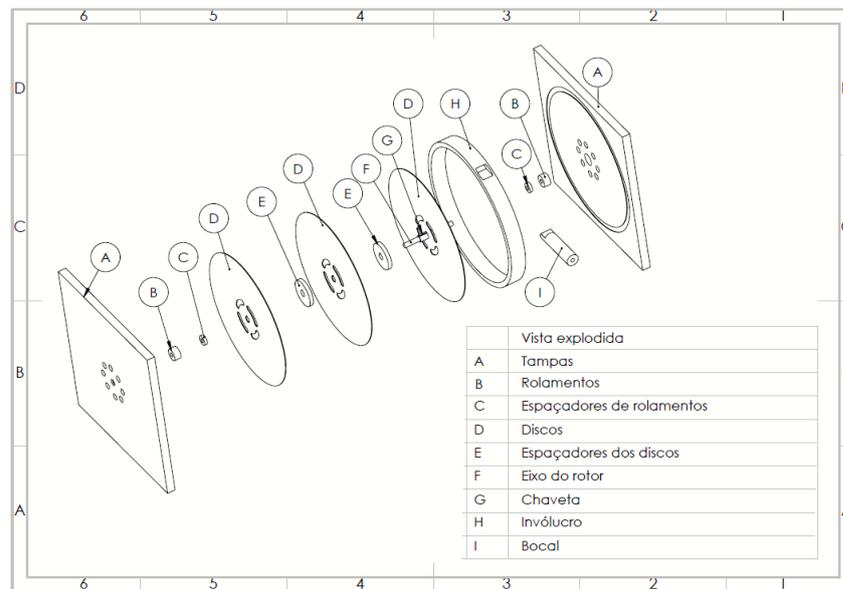


Figura 2: Vista explodida do protótipo.



Figura 3: Protótipo montado.

O teste consistiu em medir a potência disponibilizada pela turbina através de um motor de imã permanente acoplado ao eixo da turbina por um conjunto de polias e correia.

Vale ressaltar que foi utilizado um motor e não um gerador para o teste. Logo, o balanço entre energia mecânica disponível no eixo de entrada do motor e a energia elétrica disponibilizada no eixo de saída é prejudicado pelo baixo rendimento do mesmo (rendimento

não informado pelo fabricante).

Outro detalhe é que não dispúnhamos de aparatos para medir o torque diretamente no eixo da turbina, sendo necessário obtê-lo a partir da medição de potência gerada pelo motor, resultando em um valor aproximado.

## RESULTADOS

Os valores obtidos na medição são mostrados na Tabela 1.

	Valor	Unidade
Pressão da Caldeira	5,9	Bar
Rotação do motor	960	Rpm
Soma da Potência das lâmpadas	16	Watts
Tensão no Multímetro	10	Volts

Tabela 1: Valores medidos.

A partir destes, pôde-se também obter a corrente teórica gerada pelo motor, dividindo a potência pela tensão, resultando em 1,6 ampères. Assim, é possível obter uma aproximação da magnitude do torque gerado pela turbina nestas condições, conforme segue.

$$T = \frac{16}{(100,53 \cdot 9,32)} = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$$

Sendo 9,32 correspondente à redução do sistema de transmissão.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao comparar os valores providos pela teoria com estes obtidos em teste, é visível uma diferença entre ambos. As equações aplicadas ao modelo sugerem um torque de, para estas condições e regime turbulento,  $6,6 \cdot 10^{-1} \text{ N} \cdot \text{m}$  no eixo da turbina, ao passo que o valor real obtido foi de aproximadamente  $17, \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Posteriormente, um teste comparativo foi realizado utilizando ar como fluido de trabalho.

À pressão de 7,5 bar na linha de suprimento de ar comprimido, velocidade de rotação do motor de 886 rpm, foi medido com o auxílio de um multímetro digital, modelo o qual não dispúnhamos no primeiro teste com vapor, uma corrente de 1,53 A e tensão de 5,54 VCC, resultando em uma potência de aproximadamente 8,5 W e torque de  $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ .

Na tabela 2 é possível visualizar o comparativo dos valores teórico e práticos.

	Teórico	Teste c/ Vapor	Teste com Ar
Rotação da Turbina (rad/s)	902,68	936,95	865
Torque da Turbina (N.m)			
Potência da Turbina (W)	595,34	16	8,5

Tabela 2: Comparação entre os valores teórico e práticos.

Na análise destas constatações deve-se destacar alguns fatores, tais como: perdas associadas às válvulas e tubulação que leva o vapor da caldeira até a turbina, perdas no sistema de transmissão, o motor o qual a aplicação não é apropriada a este fim e o intervalo de tempo pequeno para medição disponibilizado pela caldeira, cuja rendimento baixo não permite geração de vapor à pressão constante. Também o bocal injetor, que se mostrou um tanto complexo para ser fabricado devido a mudança de geometria interna, possui uma influência tal sobre a máquina que é classificado, como mostrado em inúmeros estudos conduzidos sobre a Turbina de Tesla, como o maior detrator de rendimento do sistema.

Somado a estas considerações, a falta de equipamentos apropriados para a medição de torque, pressão e vazão também possuem sua parcela de influência sobre os resultados.

Na investigação dos fatores que contribuem para tal discrepância de valores, enumeram-se:

1 – A teoria usada como base para o método proposto por Couto leva em consideração um escoamento livre, diferente da prática em que o escoamento ocorre sob enclausuramento;

2 – Ainda sobre a teoria base, a mesma modela um fenômeno contrário ao que ocorre na turbina. Ela trata de um disco girante sobre uma superfície de fluido em repouso, que transmite movimento ao fluido fazendo com que este acelere do centro do disco em direção à periferia, enquanto que na Turbina de Tesla ocorre o contrário: o fluido injetado transmite movimento aos discos em repouso ao passo que é forçado a fluir da periferia do discos em direção ao centro devido ao gradiente de pressão interna;

3 – A teoria proposta não leva em consideração perdas no sistema, de qualquer natureza, que possa influenciar o rendimento do equipamento;

4 – O método prediz um torque em regime turbulento maior do que quando em regime laminar, em desacordo com o a base teórica (para escoamento unidirecional) que propõe que o torque laminar é de maior magnitude em relação ao turbulento devido à diferença de espessura da camada limite, como visto pela Equação (1) e Figura 4:

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad \text{Equação (1)}$$

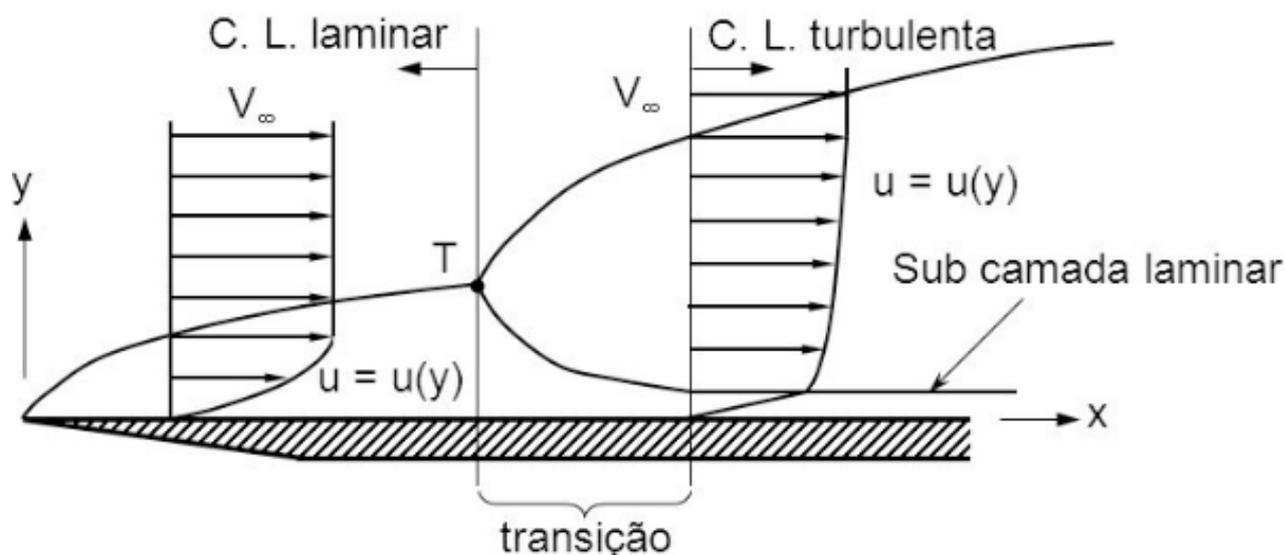


Figura 4: Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/5732728/>

5 – A equação que fornece o número de Reynolds e, portanto, caracteriza o regime de escoamento, não leva em consideração o espaçamento assumido entre os discos. Logo, o valor de Reynolds provido não possui relação alguma com as características construtivas que permitem ou não o desenvolvimento de um regime de escoamento ou outro.

## CONCLUSÃO

Os principais desafios na construção da turbina estão relacionados aos discos, que por sua espessura reduzida se faz necessário processos de fabricação e cuidados especiais no armazenamento, manuseio e montagem e ao bocal injetor, que se mostrou bastante complexo pela transição de geometria e processo de usinagem empregado para obtenção do mesmo. Ligado ao bocal e aos discos, o anel invólucro requer atenção no que diz respeito ao acabamento interno, pois qualquer imperfeição na superfície ou variação de raio pode danificar os discos que giram muito próximo dele e o furo que recebe o bocal, que deve ser perfeitamente posicionado na parte superior do anel de modo que o jato seja tangencial e incidente na altura do raio maior dos discos, com leve inclinação negativa a fim de direcionar o fluxo de maneira eficiente.

A grande capacidade volumétrica do reservatório, aliada ao baixo rendimento e elevada inércia térmica da caldeira aumenta o tempo de aquecimento para obtenção de vapor diminuindo o intervalo de tempo de fornecimento de vapor à pressão constante, que dificulta os testes e diminui a acuracidade das medições.

A carga imposta ao motor acoplado ao eixo da turbina, pelo banco de potência, não causou qualquer sinal de redução da velocidade de rotação, que estava a ser monitorada em tempo real através de um tacômetro digital. Isto mostra que a máxima capacidade de

geração da turbina nas condições de teste não foi alcançada, bem como o torque total que pode ser gerado.

A exposição de todas as influências físicas nos testes não justifica a magnitude da diferença entre os valores reais e teóricos, porém, a partir da constatação da inconsistência entre modelo de predição proposto e o fenômeno físico real ocorrente na turbina é possível compreender a não-concordância e concluir que o referido método não funciona de maneira confiável ou previsível.

## REFERÊNCIAS

- BATISTA, J. C. (2009). *Microgeração de Energia Elétrica (abaixo de 100 kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada*. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá.
- CAIRNS, W. M. (2003). *The Tesla Disc Turbine (2 ed.)*. England: Camdem.
- COURAS, D. D. (2009). *Desenvolvimento Teórico-experimental de Um Modelo de Turbina de Tesla Aplicado À Geração Descentralizada Por Fontes Renováveis*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- COUTO H. S., S. P. (2005). *Análise de Tensões em Discos de Turbina do Tipo Tesla*. Fortaleza.
- COUTO H.S., D. J.-N. (2006). *The Tesla Turbine Revisited*. Sochi, Russia.
- DEAM R.T., L. E. (2008). *On Scaling Down Turbines to Millimeter Size*. ASME Trans J Eng Gas Turbines Power.
- EPE. (2018). *Matriz Energética e Elétrica*. Acesso em 2019, disponível em Empresa de Pesquisa Energética: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>
- G1. (2019). *G1 - ECONOMIA*. Acesso em Outubro de 2019, disponível em G1: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/05/22/mais-de-800-milhoes-de-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-a-energia-eletrica-diz-banco-mundial.ghtml>
- GUHA, A., & SENGUPTA, S. (2012). *The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine*. pp. 112 - 123.
- HENN, E. A. (2006). *Máquinas de Fluido (2ª ed.)*. Santa Maria: Ed. da UFSM.
- K.E. BOYD, W. R. (1968). *Laminar inward flow of an incompressible fluid between*. ASME Trans. J. Appl. Mechanics, (pp. 229–237).
- MAIDANA, C. F. (Maio de 2015). *Desenvolvimento de Turbinas de Múltiplos Discos: Estudo de Modelos Analíticos e Análise Experimental*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MANFRIDA, G., PACINI, L., & TALLURI, L. (2017). *A Revised Tesla Turbine Concept for ORC Applications*. pp. 1055 - 1062.
- REDAÇÃO. (2017). *Resumo de geografia: Fontes energéticas e suas relações econômicas*. Acesso em Maio de 2018, disponível em Guia do Estudante: <https://guiadoestudante.abril.com.br/estudo/resumo-de-geografia-fontes-energeticas-e-suas-relacoes-economicas/>
- REMUS, F. B. (2011). *Turbina de Tesla: Projeto Construtivo*. Universidade Luterana do Brasil, Canoas.

RICE, W. (1991). **Tesla Turbomachinery**. *Proc. IV Internacional Nikola Tesla Symposium*.

Schlichting, H., & Gersten, K. (2000). **The Boundary Layer Theory**. Springer.

SENGUPTA, S., & GUHA, A. (2012). **Analytical and computational solutions for three-dimensional flow-field**. pp. 344 - 353.

SHIGLEY, J. E. (1984). **Projetos de Engenharia Mecânica (3° ed., Vol. I e II)**. São Paulo: S.A.

WU, P. (1986). **Evaluation of Analytical Models for Multiple-Disk Pump Rotor Calculations**.

## DIMINUIÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO COM A SUBSTITUIÇÃO DE BATERIAS POR SUPERCAPACITORES

Data de aceite: 02/06/2020

**Lourival Lippmann Junior**

- LACTEC

**Rafael Wagner**

- LACTEC

**Carlos Ademar Purim**

- LACTEC

**Francisco José Rocha de Santana**

- GRUPO NEOENERGIA

**RESUMO:** É apresentado o resultado do desenvolvimento de uma alternativa para alimentação contínua de equipamentos eletroeletrônicos de forma autossustentável, com vida útil superior a 20 anos e livre de manutenção, utilizando supercapacitores. Um problema para as empresas de energia elétrica é a manutenção de sistemas operando com baterias, pois frequentemente estas apresentam vida útil limitada. As trocas de baterias acarretam despesas de: materiais, mão-de-obra, uso de veículo, combustível e tempo de deslocamento. A viabilidade técnica de supercapacitores ficou comprovada em testes de campo. A viabilidade econômica pode ser comprovada pela redução de despesas em viagens a campo para manutenção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energy Harvesting, Manutenção, Smart Grid, Supercapacitor, Sustentabilidade

**ABSTRACT:** This work presents the studies on development of an alternative for continuous DC supply, using supercapacitors in a sustainable way and with lifetime greater than twenty years being maintenance-free. The usage of batteries such as lead-acid is an issue for the Companies, once their lifetime is too short. The operation of batteries replacement in the field is of high costs, because it involves material, human resources and transportation. The technical viability of the usage of supercapacitors was proven. The economical viability can be proven by the reduction of maintenance costs.

**KEYWORDS:** Energy Harvesting, Maintenance, SmartGrids, Supercapacitor, Sustainability

### 1 | INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletroeletrônicos utilizados na operação das concessionárias de energia devem operar mesmo em condições adversas de energização. Por isso, geralmente possuem fontes auxiliares de energia. Estas fontes auxiliares,

normalmente são oriundas de conjuntos de baterias que devem apresentar a capacidade suficiente para manter os equipamentos em seus estados de operação contínua, até o restabelecimento das fontes de energia primárias que alimentam os equipamentos eletroeletrônicos ou serviços auxiliares. Um grande problema para as empresas de energia elétrica é a manutenção das baterias responsáveis pela alimentação em corrente contínua dos equipamentos, pois as baterias apresentam vida útil de poucos anos em uso, ou o equivalente a aproximadamente 600 ciclos de carga e descarga necessitando, portanto serem substituídas a partir deste período. Em locais distantes ou de difícil acesso, este custo para troca obrigatória das baterias dos equipamentos se torna ainda mais representativo pois, além do material em si (a própria bateria), deve-se acrescentar os custos da mão de obra (homens/hora), gastos com veículo, combustível e tempo de deslocamento.

Para validar a aplicação de supercapacitores em substituição às baterias, foi desenvolvido um meio de comunicação composto por equipamentos eletrônicos capazes de funcionar com disponibilidade de 100% sem a necessidade de fonte de energia oriunda da rede elétrica. Este sistema ecologicamente correto de alimentação contínua não utiliza baterias, não necessita de manutenção, apresenta elevada confiabilidade, funcionando sob quaisquer condições atmosféricas, de dia ou de noite, com sol ou chuva ou tempo nublado, 24 horas por dia.

Os resultados práticos foram obtidos através da instalação em campo destes equipamentos autossustentáveis desenvolvidos. A viabilidade técnica ficou comprovada a partir dos registros de medição contínua, obtidos pela observação durante meses e sob diversas condições atmosféricas. Foi verificado não somente o funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos em si, mas também os níveis de carga e recarga dos supercapacitores, que não fizeram uso durante todo o período de testes de nenhuma fonte de energia elétrica da rede. Ou seja, são dispositivos autossustentáveis. A viabilidade econômica é comprovada pela redução nos custos de troca de baterias em campo, pois os supercapacitores apresentam elevada vida útil, aproximadamente 10 vezes maior que a das baterias tradicionais.

Neste trabalho foi utilizado o conceito de “Energy Harvesting”, no qual toda a energia necessária para o funcionamento de um sistema é retirada do meio ambiente de forma autossustentável e ecologicamente correta, pois os supercapacitores não fazem uso de materiais nocivos ao meio ambiente.

## 2 | DESENVOLVIMENTO

A metodologia utilizada neste desenvolvimento se baseou na utilização de supercapacitores de camada dupla tipo EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitors) e células fotovoltaicas monocristalinas encapsuladas em vidro. Os supercapacitores (ou ultracapacitores) de camada dupla armazenam energia eletrostaticamente polarizando uma solução eletrolítica. Os capacitores convencionais separam suas placas com material dielétrico tipo plástico, papel ou filme cerâmico. Quanto mais fino é o dielétrico, maior área

pode ser criada dentro de um mesmo volume. Por outro lado, é a espessura do dielétrico que limita a superfície e, portanto, limita a capacitância máxima alcançada por volume. Os supercapacitores criam sua área de placa através de materiais com carbono poroso. A estrutura altamente porosa deste material faz com que sua área atinja cerca de 2000 metros quadrados por grama, várias vezes maior que as placas utilizadas nos capacitores convencionais. Nos supercapacitores, a separação entre as cargas é determinada pelo tamanho dos íons no eletrólito, que são atraídos para os eletrodos. Esta separação de carga costuma ser de somente 10 angstroms ( $10 \times 10^{-10}$  m), o que é muito menor do que a espessura dos dielétricos utilizados nos capacitores convencionais. Esta combinação de área muito grande com a baixíssima separação de cargas é o segredo que permite a construção dos supercapacitores.

Neste projeto, foi desenvolvido um sistema autossustentável para alimentação de energia contínua, 24 horas por dia, para roteadores de comunicação com vida útil elevada, acima de 20 anos, sem a necessidade de manutenção. O cálculo da energia necessária e a escolha criteriosa de componentes gerou um sistema de roteadores de comunicação para ambientes de Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grids) capazes de funcionar sem a necessidade de fonte de energia da rede elétrica.

## 2.1 O painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico proposto foi o de tecnologia monocristalina. Em testes de laboratório, este painel se mostrou mais eficiente em baixas luminosidades em relação a outras tecnologias de painéis, o que se mostrou muito favorável para o projeto proposto, sendo possível gerar energia elétrica com a menor quantidade de luz solar disponível.

A tecnologia do painel é bem consolidada e conhecida, sendo muito vantajoso utilizar este conceito, pois elimina uma preocupação de projeto. Os elementos fotovoltaicos têm durabilidade aproximada de 25 anos, garantindo alta confiabilidade ao produto.

## 2.2 Os supercapacitores

Os supercapacitores são basicamente eletrodos de carbono porosos imersos em eletrólito e separadores, que impedem as cargas de se moverem entre eletrodos de polaridades diferentes. A Figura 1 apresenta uma ilustração da característica construtiva de um supercapacitor.

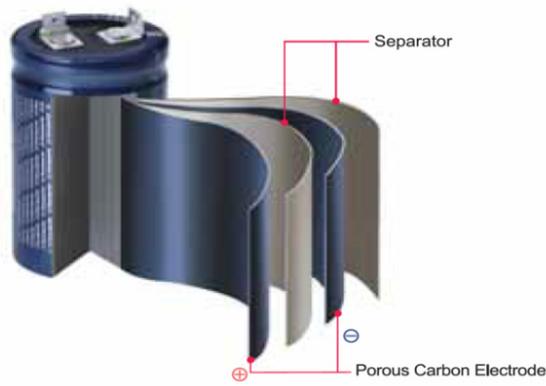


FIGURA 1 – Construção do supercapacitor.

O princípio de funcionamento de um supercapacitor é o de dupla camada, em que cargas eletrostáticas se formam na interface entre eletrodo e eletrólito, e íons distribuídos aleatoriamente se movem para as superfícies de carga oposta. Esta reação é puramente física, sem reações químicas, sendo um processo altamente reversível, resultando em alta capacidade de potência, alto número de ciclos de carga e descarga, sem a necessidade de procedimento específico de manutenção. A Figura 2 apresenta o princípio de funcionamento de um supercapacitor.

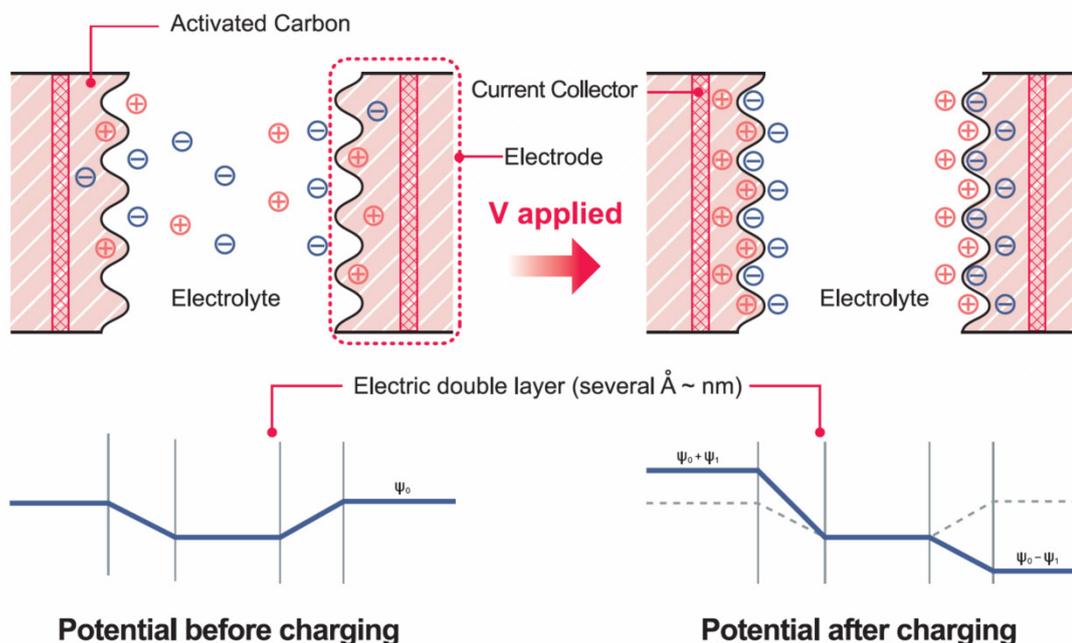


FIGURA 2 – Princípio de funcionamento do supercapacitor.

Os supercapacitores apresentam alta confiabilidade. A maioria dos fabricantes garantem uma vida útil plena de 15 anos, sendo que no final da vida útil a capacitância ainda estará em 80% da inicial, com um risco muito baixo de tornar o sistema inoperante, pois este elemento dificilmente perderá sua funcionalidade por completo.

Como ilustrado na Figura 3, a grande dificuldade na utilização dos supercapacitores

como substituto direto de baterias para alimentação contínua de componentes ou módulos eletrônicos está no fato da descarga dos supercapacitores ser extremamente linear, ou seja, a tensão fornecida não é fixa e decai continuamente em função do tempo em operação, mesmo com uma carga fixa, ao contrário das baterias em que a tensão de fornecimento permanece praticamente a mesma até o fim de sua autonomia, quando então cai bruscamente.

Pelo exposto acima, para que possa ser utilizada a energia armazenada em um supercapacitor como fonte de tensão contínua para um módulo ou componente eletrônico, é necessária a transformação deste perfil de descarga de tensão linear em um perfil semelhante ao de uma bateria.

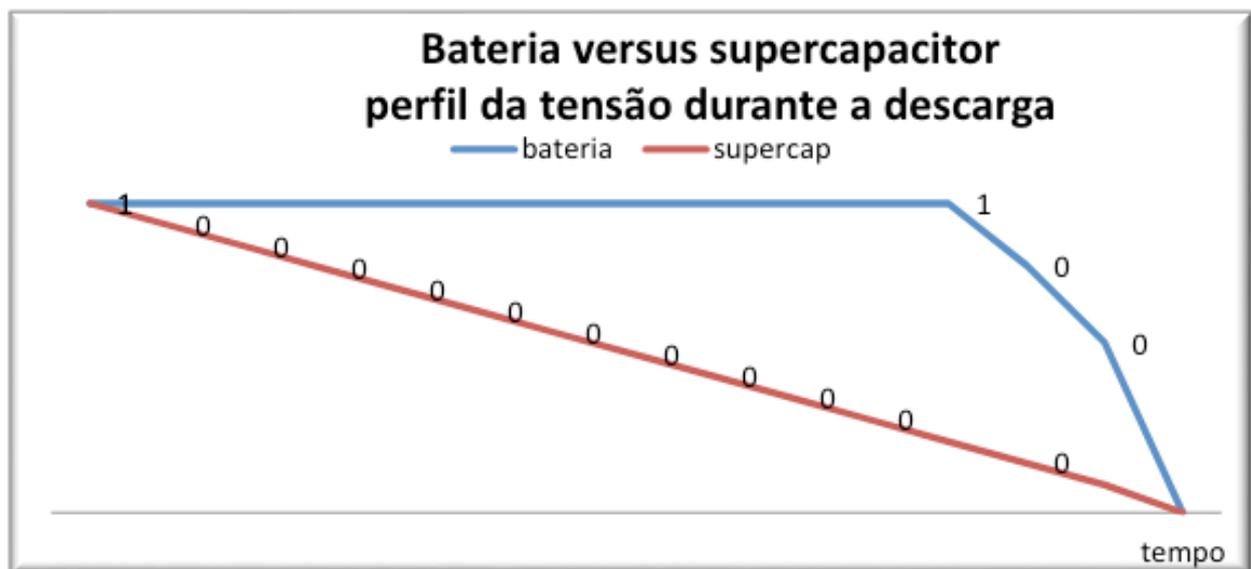


FIGURA 3 – Dificuldade para uso direto de supercapacitores como substituto de baterias.

### 2.3 Projeto eletroeletrônico

O sistema desenvolvido utiliza uma fonte solar com um carregador que funciona como um conversor DC/DC, ou seja, uma eletrônica que vai adaptar a tensão do painel solar para a tensão dos capacitores. Posteriormente ao capacitor, o sistema incorpora um conversor para manter a tensão DC regulada e constante para a aplicação. Vê-se na Figura 4 o diagrama em blocos do projeto eletroeletrônico da fonte de alimentação DC, de controle de carga e descarga do sistema com supercapacitores, e a saída regulada para a aplicação.

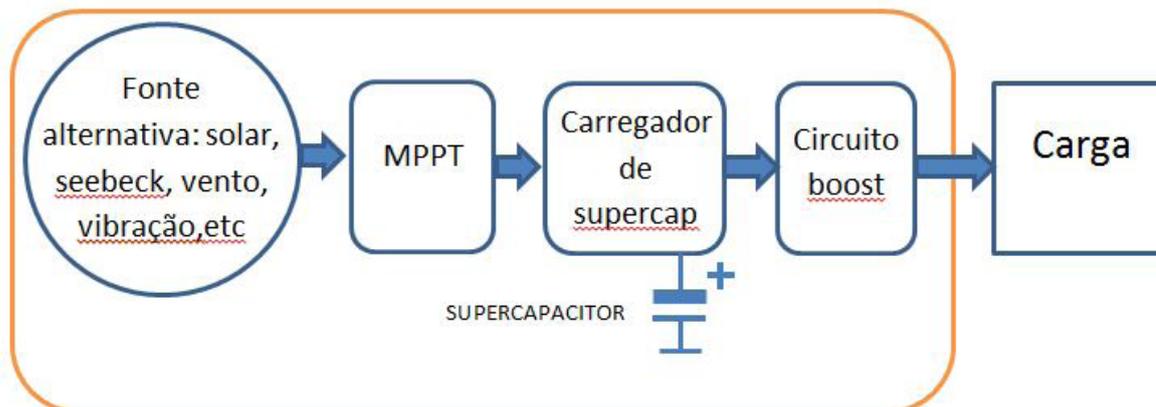


FIGURA 4 – Diagrama em blocos da fonte de energia autossustentável.

O carregador implementa o conceito de rastreamento de ponto de potência máxima (*MPPT-Maximum Power Point Tracking*). No caso desta aplicação, utiliza-se o algoritmo de tensão fixa, que funciona da seguinte maneira: o painel fotovoltaico tem uma tensão de *MPP* definida para os valores testados de radiação solar. Esta tensão varia muito pouco quando a variação de radiação solar muda. Assim sendo, como garantia se faz um circuito que sempre procura manter uma tensão fixa no barramento do painel, que é uma tensão um pouco mais baixa do que a tensão especificada, mantendo assim uma geração de energia elétrica muito próxima da ótima para o circuito. Há outras técnicas mais complexas de *MPPT*. Porém, para este nível de potência, o circuito de controle consumiria mais energia do que a vantagem que ele teria em relação ao algoritmo de tensão fixa. Este último é muito simples e com perdas de corrente elétrica próximas a zero.

O supercapacitor utilizado precisa fornecer energia suficiente para manter a carga e a aplicação operando durante toda a noite. Com dados medidos, foi constatado que um elemento que armazene energia suficiente para operar durante 17 horas seria suficiente para garantir funcionamento ininterrupto. Este cálculo foi feito com os dados de energia necessária ao sistema, por exemplo: para uma carga (rádio neste caso) alimentada por uma tensão de 3,3VDC e com consumo médio de 35mA. A fórmula de cálculo da energia acumulada necessária é apresentada abaixo:

$$E = V * I * tempo (Wh)$$

Aplicando-se os valores especificados, tem-se:

$$E = 3,3 * 0,035 * 17 = 2,0Wh$$

Para fazer o cálculo da capacitância mínima, é necessário que se saiba a faixa de tensões a ser aproveitada do capacitor. No caso do circuito implementado, é possível operar da tensão máxima definida de 2,65V até 0,7V. O circuito eletrônico opera com uma eficiência de 0,85. O cálculo da energia contendo as variáveis de capacitância (C) e de eficiência ( $\eta$ ) é apresentado a seguir:

$$E = \frac{\frac{1}{2} C * V^2 * \eta}{3600} (Wh)$$

Isolando a variável de capacitância, tem-se:

$$C = \frac{2 * 3600 * E}{(V_{max}^2 - V_{min}^2) * \eta} (F)$$

Para o sistema projetado, aplicam-se os valores e calcula-se a capacitância:

$$C = \frac{2 * 3600 * 2}{(2,65^2 - 0,7^2) * 0,85} = 2600F$$

Como o valor comercial mais próximo de supercapacitor é de 3000F, foi este que foi utilizado. Assim, garantiu-se o funcionamento do sistema com a segurança da autonomia. O conversor de tensão de saída é de extrema importância e define a eficiência com que o sistema opera. Quanto melhor é este elemento no circuito, mais poderá ser economizado em capacitor. Para o projeto, foi necessária a implementação de um *boost*, um circuito elevador de tensão que é capaz de operar com tensões de entrada muito baixas (como de 0,7V a 2,65V), conseguindo para toda a faixa regular na saída um valor de tensão constante de 3,3V. Este tipo de circuito para baixas potências seria de difícil implementação se fosse utilizada eletrônica discreta convencional, pois não seria possível alcançar a eficiência necessária. Portanto, o ideal é trabalhar com frequências de chaveamento elevadas, próximas a 1MHz, o que inviabiliza a utilização da eletrônica convencional. Neste projeto foram utilizados componentes conversores integrados que contêm a chave e os elementos de controle na mesma pastilha de silício, sendo necessário apenas um indutor externo.

A eletrônica projetada teve de possuir alto grau de confiabilidade. Como o maior benefício do projeto é a redução da necessidade de manutenção, a confiabilidade dos elementos eletrônicos deve também ser equivalente a aquela dos elementos de armazenamento. Para isso, foram feitos estudos dos componentes e suas confiabilidades, para conseguir manter uma garantia de funcionamento do circuito de, no mínimo, 15 anos.

## 2.4 Aplicação prática

O cálculo energético e a escolha criteriosa de componentes gerou um sistema de roteadores de comunicação para

ambientes de *Smart Grid*, capaz de funcionar 24 horas por dia sem a necessidade de nenhuma fonte de energia oriunda da rede elétrica. Este sistema ecologicamente correto de

alimentação contínua não utiliza baterias, não necessita manutenção, apresenta elevada disponibilidade e confiabilidade, funcionando sob quaisquer condições atmosféricas, de dia ou de noite, com sol ou chuva ou tempo nublado.

Para avaliar a funcionalidade e a utilidade prática para empresas do Setor Elétrico Brasileiro, na substituição de baterias por supercapacitores, foram montados equipamentos roteadores de comunicação sem fio para redes em malha. Uma rede de testes foi estabelecida na cidade de Curitiba/PR. Foram testadas funções de leitura remota de grandes consumidores via protocolo ABNT NBR 14522, leitura e telecomando de religadores via protocolo DNP3, comando e supervisão de pontos de iluminação pública e detecção de queda e retorno de energia (função ARGOS). Em particular para a função ARGOS (detecção de queda/retorno de energia), no evento de queda de energia, toda a energia necessária para o envio da informação ao Centro de Operação deve ser oriunda de fonte alternativa, pois a energia da rede estará indisponível naquele momento.

### 3 | RESULTADOS

O circuito eletrônico do roteador de comunicações foi implementado na prática, sendo possível fazer uma montagem extremamente compacta devido aos baixos níveis de corrente. Todos os componentes são miniaturizados e facilmente adaptados mecanicamente. As Figuras 5-(a), 5-(b) e 5-(c) são fotos do primeiro protótipo desenvolvido, mostrando os componentes internos e o invólucro em fibra de vidro. Este protótipo com invólucro anti-intempéries foi instalado no telhado do edifício sede do Lactec em Curitiba/PR, cidade que estatisticamente apresenta pouca insolação, sendo assim um bom cenário de testes.

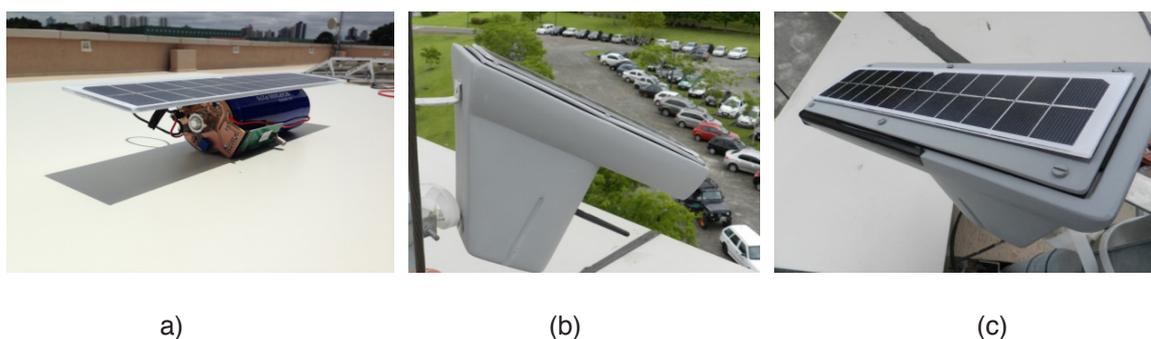


FIGURA 5 – Fotos do circuito do primeiro protótipo do roteador de dados autossustentável.

A Figura 6 apresenta a curva medida da tensão do supercapacitor, podendo ser observadas as cargas e descargas.

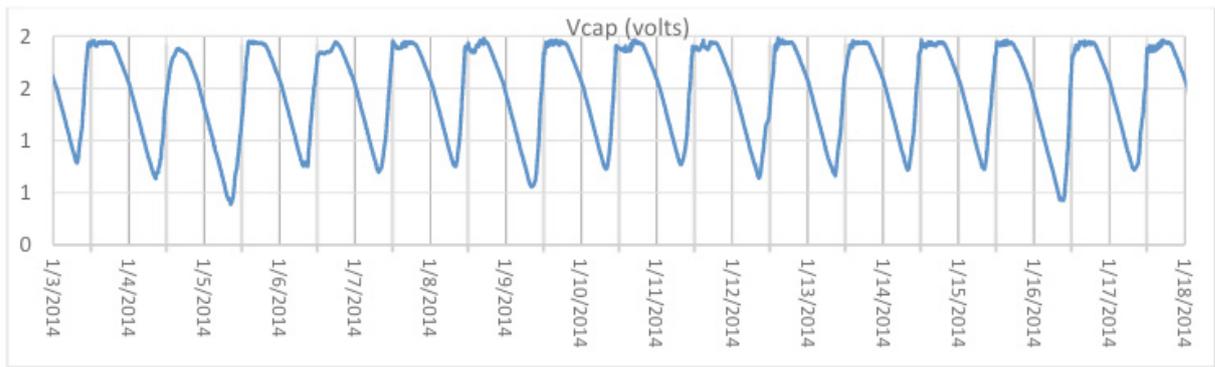


FIGURA 6 – Curva de tensão elétrica sobre o supercapacitor, aplicação de roteador autossustentável.

Foram feitos ensaios e testes com diversas marcas e modelos de supercapacitores. Nas Figuras 7-(a) e 7-(b) são mostrados circuitos de teste para validação de supercapacitores de 900 Farads, utilizados em 200 roteadores de comunicação instalados em Curitiba/PR e Niterói/RJ.

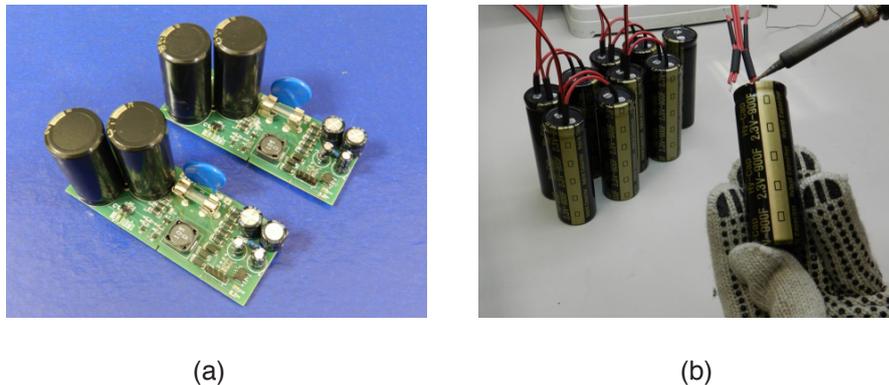
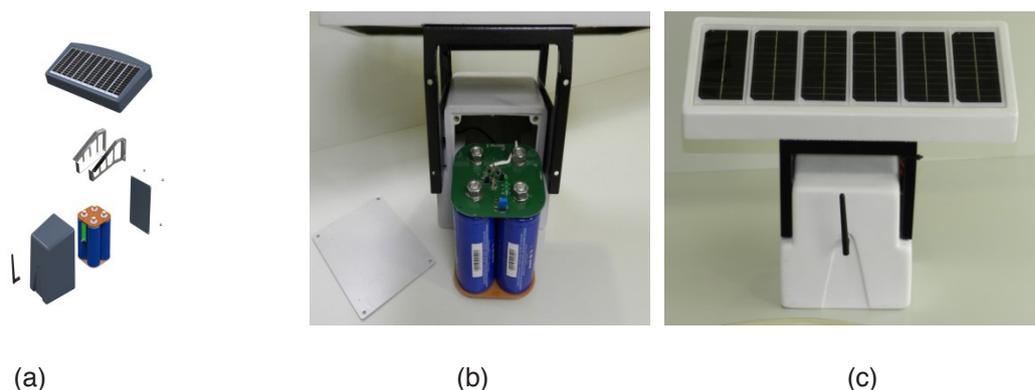


FIGURA 7 – Circuito para testes de campo de supercapacitores de 900 Farads.

Percebeu-se que o sistema se manteve operacional com uma boa autonomia, e a tensão no supercapacitor chegou a um mínimo de 1,1V, sendo que o limite operacional era de 0,7V. O equipamento evoluiu para um conjunto mais robusto contendo quatro supercapacitores de 3000 Farads cada um, ligados em paralelo, permitindo assim a alimentação contínua de equipamentos de maior potência sob qualquer condição atmosférica. O equipamento é apresentado nas Figuras 8-(a), 8-(b) e 8-(c).



Os testes de campo em Curitiba/PR tiveram resultados positivos. Todo o sistema se comportou como esperado, estando funcional por mais de dez meses ininterruptamente, suportando dias de chuva, neblina, granizo e sol. Para monitorar este funcionamento foi colocado no rádio da aplicação uma medição e registro periódico da tensão no supercapacitor, a cada 5 minutos. A Figura 9 apresenta algumas medidas. Dos dados, pode ser observado que mesmo com uma grande variação na radiação solar disponível no decorrer dos dias (nuvens e chuva entre os dias 21 e 26), o sistema se manteve operante, sem apresentar nenhum desligamento, garantindo a confiabilidade e o funcionamento da aplicação de forma ininterrupta e autossustentável.

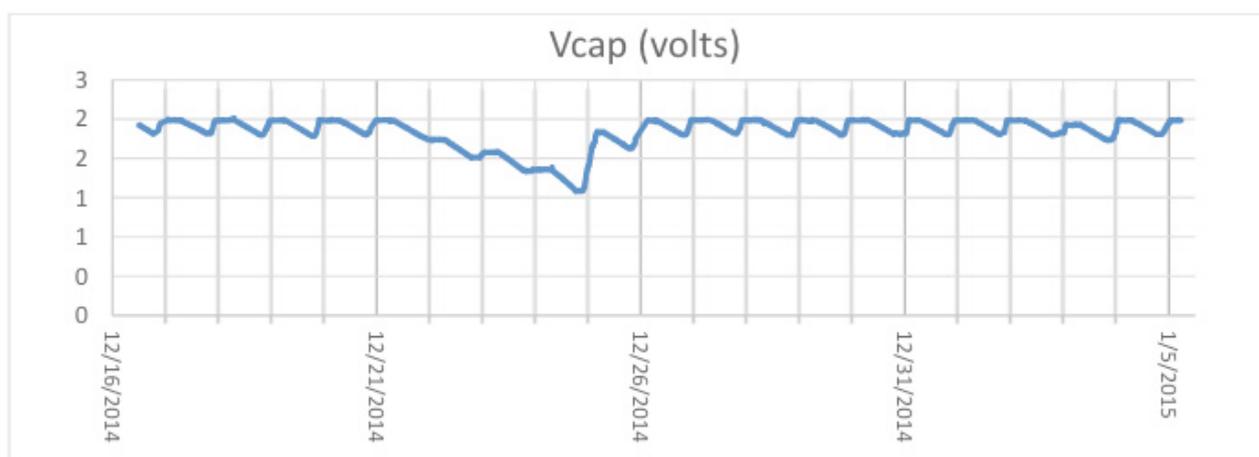


FIGURA 9 – Gráfico do nível de tensão sobre os supercapacitores em regime de campo.

#### 4 | CONCLUSÕES

Os resultados práticos foram obtidos através da instalação em campo dos protótipos autossustentáveis desenvolvidos. A viabilidade técnica de roteadores autossusstentáveis para meios de comunicação sem fio ficou comprovada a partir dos registros de medição contínua obtidos durante vários meses sob diversas condições atmosféricas adversas. As aplicações utilizadas nos testes foram a leitura remota de grandes consumidores de energia elétrica via protocolo ABNT NBR 14522, a leitura e telecomando de religadores via protocolo DNP3, o comando e supervisão de pontos de iluminação pública e a detecção de queda e retorno de energia (função ARGOS). Ficou comprovado não somente o funcionamento do meio de comunicação em si de forma ininterrupta, independentemente de baterias, mas também que os níveis de carga e descarga dos supercapacitores permitem que os mesmos possam ser utilizados em sistemas de rede autossustentáveis, fazendo uso do conceito de “Energy Harvesting”, no qual toda a energia necessária para funcionamento é retirada do meio ambiente de forma ecologicamente correta (energia limpa).

## REFERÊNCIAS

- ABRUÑA, H. D.; KIYA, Y.; HENDERSON, J. C. (2008). "Batteries and Electrochemical Capacitors". *Phys. Today* (12): 43–47.
- BOCKRIS, J. O'M.; DEVANATHAN, M. A. V.; MULLER, K. (1963). "On the Structure of Charged Interfaces". *P. Roy. Soc. Lond. A Mat.* 274: 55–79. doi:10.1098/rspa.1963.0114.
- BÉGUIN, F.; RAYMUNDO-PIÑEIRO, E.; FRACKOWIAK, E. (2009). "8. Electrical Double-Layer Capacitors and Pseudocapacitors". *Carbons for Electrochemical Energy Storage and Conversion Systems*. CRC Press. pp. 329–375. doi:10.1201/9781420055405-c8. ISBN 978-1-4200-5540-5.
- CONWAY, B. E. (1999). *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer. doi:10.1007/978-1-4757-3058-6. ISBN 0306457369.
- ZHANG, J.; ZHANG, L.; LIU, H.; SUN, A.; LIU, R.-S. (2011). "8. Electrochemical Supercapacitors". *Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion*. Weinheim: Wiley-VCH. pp. 317–382. ISBN 978-3-527-32869-7.
- LEITNER, K. W.; WINTER, M.; BESENHARD, J. O. (2003). "Composite Supercapacitor Electrodes". *J. Solid State Electr.* 8 (1): 15–16. doi:10.1007/s10008-003-0412-x.
- EBRAHIMI (EDITOR), F. (September 27, 2012). *Nanocomposites - New Trends and Developments*. InTech. doi:10.5772/3389. ISBN 978-953-51-0762-0.
- KINOSHITA, K. (January 18, 1988). *Carbon: Electrochemical and Physicochemical Properties*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-84802-8.
- ZAMBENEDETTI, V. C., et al, Projeto Estratégico de P&D Redes Elétricas Inteligentes – Medição – P2.01 a P2.12 - Relatório Final. Lactec, Curitiba, 2011.
- METHLEY, S. *Essentials of Wireless Mesh Networking*, Cambridge University Press, 2009, p.72.
- MISIC V. B. "Wireless Personal Area Networks Performance, Interconnections and Security with IEEE 802.15.4", Ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2008, p. 33.
- LIPPMANN L. Jr. "Configuração Aplicada em Unidade de Comunicação para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica" LACTEC – INPI DI 7005101-1, 20 de dezembro, 2010.
- LIPPMANN L. Jr, "Dispositivo Adaptador para Redes de Comunicação sem Fio Autônoma disposta junto a Redes de Distribuição de Energia Elétrica" LACTEC - INPI PI 1101469-4, 01 de abril, 2011.
- ZAMBENEDETTI, V. C., LIPPMANN L. Jr. "Seção: No Circuito- TI Tech Day Mostra Produtos para Área de Energia", *Revista Eletricidade Moderna*, Editora Aranda, outubro 2011, p.9-12.
- ZAMBENEDETTI, V. C., LIPPMANN L. Jr. "Seção: No Circuito – Texas Instruments", *Revista Eletricidade Moderna*, Editora Aranda, setembro 2012, p. 20-23.

## O FUTURO DAS TÉRMICAS NA MATRIZ BRASILEIRA – PRÁTICAS E FUNDAMENTOS

Data de aceite: 02/06/2020

**João Carlos de Oliveira Mello**  
THYMOS ENERGIA

**Thaís Melega Prandini**  
THYMOS ENERGIA

**Marcelo Ajzen**  
THYMOS ENERGIA

**Xisto Viera Filho**  
ABRAGET

**Edmundo Pochman da Silva**  
ABRAGET

**RESUMO:** Este artigo busca apresentar os fundamentos conceituais e novas práticas sugeridas que respaldam a necessidade de térmicas no sistema com argumentos técnicos. A proposta é avaliar a inserção de novos projetos térmicos com características de despacho na base no futuro da matriz e capturar os benefícios associados a esta meta, num balanço adequado de custos e segurança para o sistema. Isto deve passar pela indicação mais precisa dos critérios adotados no planejamento da expansão, e ao mesmo tempo estabelecer critérios técnicos e econômicos para a quantificação do montante necessário de térmicas em cada leilão. As conclusões buscam oferecer

de forma clara a abordagem sugerida na inclusão objetiva das térmicas na matriz de energia elétrica nacional. Paralelamente são também apresentados casos testes que apontam de forma incontestável a necessidade de aprimorar a segurança do sistema com as térmicas, que também auxiliam o controle de custos ao consumidor final.

**PALAVRA-CHAVE:** Térmicas, Expansão da Geração, Novas Oportunidades.

### 1 | INTRODUÇÃO

A matriz de geração de energia elétrica brasileira é caracterizada por ser predominantemente renovável, onde as usinas hidrelétricas geram mais de 70% da eletricidade consumida no país. A geração térmica exerce uma importante função de complementaridade no sistema brasileiro e cada vez mais será necessária. O setor elétrico atravessa por um momento de transição estrutural importante da sua matriz (i) A presença maior de projetos termelétricos é uma realidade, (ii) Novos projetos de geração renovável (hidráulicos e eólicos) com produção intermitente fará com que térmicas sejam despachadas com maior frequência para assegurar o suprimento

energético, e evitar problemas para a operação, uma vez poderão ocorrer agravamentos da estabilidade transitória e dinâmica do SIN se não forem tomadas, com antecedência, as devidas precauções; (iii) Novas regras no setor (Resolução CNPE nº 3/2013 [5]) buscam priorizar a segurança do suprimento energético, o que resultará num despacho térmico mais significativo.

As fontes renováveis, por serem especialmente dependentes do clima, necessitam da inserção de geração térmica para promover a segurança do sistema, evitando riscos de abastecimentos ocasionados por alterações climáticas. O planejamento eficaz da expansão do parque gerador de energia deve atender aos critérios de segurança operativa e de minimização dos custos de expansão. A configuração de expansão da geração proposta deve, portanto ser elaborada de modo a minimizar os custos de expansão esperados, formados pelos custos referentes aos novos investimentos no sistema, os custos marginais de operação e os correspondentes custos associados ao risco de déficit de energia. Levando em conta estes aspectos de forma conjunta a meta é obter um plano de obras de geração que minimize os investimentos e o custo da operação esperado, incluindo o despacho e a segurança do sistema.

A Resolução CNPE nº 03 [5] estabeleceu diretrizes para a internalização de mecanismos de aversão a risco nos programas computacionais para estudos energéticos e formação de preço. Um dos efeitos esperados com a aplicação da aversão ao risco é uma mudança no padrão do despacho térmico. As amplitudes entre despacho mínimo e máximo ao longo do ano serão menores, reconhecendo de forma determinante a necessidade da complementação térmica quase que permanente. Isto resulta na manutenção de um despacho mais alto de térmicas nas séries hidrológicas mais críticas, porém a presença térmica ainda se fará presente em grande parte do tempo. Isto é devido ao crescimento do volume das energias intermitentes (hidráulicas a fio d'água e eólicas) que faz com que a curva de permanência do despacho térmico seja maior que o atual. A mudança no padrão de despacho térmico é uma necessidade estrutural e o modelo de aversão ao risco captura esta tendência até o limite da capacidade instalada do parque térmico.

A complementaridade térmica, além de assegurar a segurança do sistema, deve ser planejada de modo a minimizar os custos de operação do sistema. É importante ressaltar que a frequência de despacho térmico futura não é compatível com a matriz térmica atual com poucas térmicas na base.

Neste contexto, se faz necessária um aprimoramento nas metodologias de planejamento empregadas no setor elétrico brasileiro, quanto aos critérios de planejamento e segurança do sistema, além da análise dos aspectos econômicos e financeiros da expansão da oferta, que possibilite uma abordagem mais realista e resulte em um planejamento eficaz em termos de segurança e custos.

Este trabalho propõe discutir as vantagens de um planejamento hidrotérmico para assegurar a segurança e a confiabilidade do sistema. Na realidade, os autores acreditam que o PDE 2023 é tímido na proposição de novos projetos térmicos, e apenas no período 2019 a 2023 admite a entrada de blocos térmicos (7500 MW) sem necessariamente especificar as

fontes envolvidas. Seria fundamental que se buscasse diagnosticar melhor a composição dos blocos térmicos, sinalizando inclusive seu padrão de “despachabilidade” (base ou flexível) para orientação de investidores que desejam formatar suas soluções. A especificação dos blocos térmicos deve seguir uma metodologia que busque refletir realmente o papel das térmicas – segurança e previsibilidade. Outro debate importante é que o planejamento da oferta deve ser não só indicativo e dominado pelos leilões públicos, mas deve existir uma sincronia com o melhor padrão para o SIN.

Este artigo busca oferecer uma descrição das melhores práticas na consideração da **geração térmica**, como um novo vetor na expansão, e sua sincronia com o planejamento do setor elétrico como um todo. São apresentados alguns casos práticos com a experiência dos autores no diagnóstico do planejamento do setor elétrico nacional.

## 2 | O MOMENTO DAS TÉRMICAS NO SISTEMA

No setor elétrico antes das reformas no seu modelo em meados da década de 90 do século passado, a competição entre a energia térmica e a energia hidráulica pelo mercado não existia. Numa conjuntura onde o sistema era predominantemente hidráulico com grande capacidade de armazenamento, as poucas usinas termelétricas existentes funcionavam apenas como reserva estratégica (“backup”). A competitividade da energia hidráulica no passado tornava a energia térmica muito pouco atraente do ponto de vista de um planejamento centralizado, e o Brasil não tinha um mapeamento fiel da sua capacidade de produção de combustíveis para suprir as térmicas. O aproveitamento ótimo da capacidade geradora existente ao menor custo possível para o consumidor final, sempre implicou numa predominância do despacho das hidráulicas.

A partir da primeira reforma no modelo de 1995-2003 (Lei 9074/1995 e outras), a ideia da competição das fontes de geração estava fundamentada na criação de um mercado competitivo de energia com base na contratação bilateral entre os agentes do mercado. Neste modelo foi mantido o mesmo conceito de minimização do custo de operação do sistema, através do despacho ótimo das fontes disponíveis. O programa prioritário de termelétricidade – PPT foi lançado em fevereiro de 2000, por meio do Decreto 3.371/00 e regulamentações posteriores. Havia uma clara intenção de ancorar o projeto do gasoduto Brasil – Bolívia (GASBOL) no mercado termelétrico. Este programa objetivava o incremento da capacidade instalada termelétrica no País, através da aplicação de diversos incentivos, dentre os quais: garantia do suprimento de gás natural por até 20 anos; garantia de aplicação de um valor normativo para a distribuidora de energia elétrica repassar para as tarifas por 20 anos; garantia de acesso a recursos financeiros do BNDES, e preço único do gás natural em todo o País. O PPT, entretanto, passou por várias incertezas em relação às diretrizes do setor elétrico e ao suprimento de combustíveis, o que potencializou a dificuldade para sua implantação plena, resultando numa significativa diferença entre o número de usinas projetadas e as efetivamente construídas, ou em construção.

O novo modelo após 2004 (Lei 10.848/2004) manteve a competição pelo mercado para

as fontes de geração através da contratação bilateral. Os problemas de competitividade das térmicas com as usinas hidráulicas continuam, muito embora o sistema interligado atual tenha se tornado cada vez mais hidrotérmico. Uma gestão eficiente das fontes no atendimento à segurança operativa é primordial, e neste sentido o novo modelo de 2004 inclui o leilão de energia nova, visando à expansão com base na competitividade pelo mercado do ACR (distribuidoras), e incluiu a modalidade de contratação por disponibilidade para atrair novos investidores em projetos termelétricos com a minimização dos riscos do despacho, provocados pela variação das condições hidrológicas, que influenciam as hidrelétricas.

O racionamento de eletricidade em 2001 trouxe reflexões importantes para a recomposição da matriz brasileira, e novas unidades térmicas foram agregadas paulatinamente ao sistema. Com efeito, desde 1998 já se reconhecia a necessidade de se agregar fortemente geração térmica a matriz nacional, haja visto a criação do PPT (Programa Prioritário de Geração Termelétrica), cujas principais usinas, no entanto, somente se materializaram alguns anos após a criação do Programa. Entretanto, é possível afirmar que o volume não foi suficientemente adequado e a composição da “pilha térmica”, para o despacho por mérito, ainda está muito longe de ser uma razoabilidade de custos.

A Tabela 1 ilustra a evolução da matriz de energia elétrica do ponto de vista do operador (ONS). Notar que houve grandes mudanças de padrão de 2001 a 2015, com o aumento total da oferta em diversos segmentos, inclusive o térmico. Isto promove uma sensação de maior segurança, porém o aumento da capacidade térmica ainda não suficiente para afirmar que o sistema hoje é mais seguro que em 2001.

Ao mesmo tempo, o segmento hidrelétrico cresceu 40% em capacidade instalada, porém em capacidade de armazenamento o crescimento foi bem menor, devido à diminuição de novas usinas com reservatório.

Tipo de Oferta (MW inst.)	2001	2015
Hidráulica	64.705	90.114
Térmica	5.545	19.187
Nuclear	1.966	2.007
PCH	855	4.914
Biomassa	0	9.994
Eólica	21	4.975
<b>TOTAL</b>	<b>73.092</b>	<b>131.191</b>
<b>Cap. Armazenam. (MW.médio)</b>	<b>236.505</b>	<b>288.790</b>
<b>Carga (MW.médio)</b>	<b>40.632</b>	<b>66.222</b>

Tabela 1 – Evolução da Matriz (2001-15)

Fontes: 2001 – ONS e 2015 – CCEE: Boletim de Operação das Usinas – fev/2015

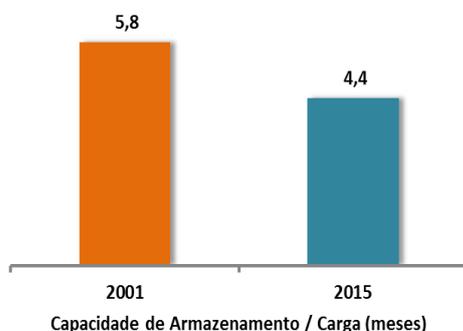


Figura 1 – Redução do Estoque Regulador (2001-15)

Com isto se alcança uma redução do estoque regulador como ilustrado na Figura 1. A segurança é aparentemente menor devido a esta redução apesar do aumento das térmicas. Outra visão sobre o mesmo problema de segurança é que a carga líquida que as hidrelétricas “enxergam”, ou seja, a carga total menos a garantia física (GF) das demais fontes. A partir do cálculo da GF dos demais segmentos, e sabendo que o fator de capacidade do sistema caiu de 62% para 53%, e a GF hidrelétrica (50 GW.médios em 2015 e 39 GW.médios em 2001) está com uma margem frente a carga líquida que é praticamente mesma em 2015 e 2001 (cerca 15%). Ou seja, o sistema em 2015 está tão vulnerável aos riscos hidrológicos como estava em 2001. Isto pode ainda se tornar mais crítico com a revisão da GF das hidrelétricas, que foram em sua maioria calculadas com o critério de suprimento de risco de déficit de 5%, e que serão reduzidas ao modificar com o critério de cálculo para  $CMO=CME$ .

Esta situação de dependência extrema das condições hidrológicas das hidrelétricas já deveria estar resolvida como meta do planejador. As tentativas de redução da dependência da geração elétrica da fonte hidráulica reforça a necessidade a adoção de um programa realista de construção de termelétricas. Outro fator de preocupação no uso extensivo das termelétricas é composição da “pilha térmica”, para o despacho por mérito realizado pelo ONS. A ordem de mérito apresenta um perfil muito reduzido de térmicas de base, o que faz com que os custos do despacho térmico se dirijam rapidamente para o uso de fontes mais custosas.

Na **Figura 2** é apresentada a “pilha térmica” do ano de 2015 e de 2019. Percebe-se uma melhora na entrada de térmicas de base até 2019, que correspondem a usina nuclear de Angra 3, outras térmicas à carvão e gás natural ciclo combinado, que estavam em atraso ou foram selecionadas no último leilão A-5 de 2014. É possível notar que na **Figura 2** houve até 2019 uma mudança no padrão com capacidade adicional térmica de 1,9 GW com CVU até R\$ 200/MWh e 3,5 GW com CVU até R\$ 400/MWh. Estas novas térmicas mudam o padrão da “pilha térmica”, mas os autores entendem que ainda não é suficiente.

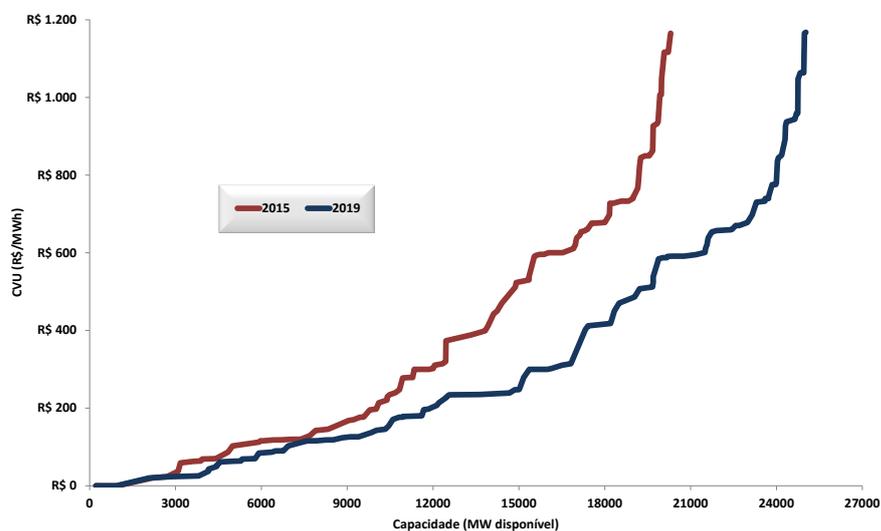


Figura 2 – Evolução da Pilha Térmica – R\$/MWh (moeda constante)

### 3 | AS TÉRMICAS NA EXPANSÃO - LEILÕES

Grande parte da expansão está apoiada nos leilões públicos para comercialização de energia no mercado regulado (70% do volume total). A prática comercial do novo modelo exigiu compromissos com a nova oferta com alguma antecedência, seja cinco ou três anos antes da entrada em operação da nova geração. Desta forma no âmbito do plano decenal uma parcela da expansão já está previamente contratada e não é mais uma variável de decisão do planejamento. A expansão é hoje uma definição do mercado e o planejamento busca definir tendências futuras e as melhores opções do ponto de vista do planejador para a expansão. Entretanto, comparando os resultados dos leilões de energia nova (LEN) e o planejamento, se percebe uma discrepância grande entre o que está planejado e o que está sendo contratado, principalmente no que se refere à expansão térmica. Esta falta de

sincronia entre a resposta do mercado e o planejado deve ser minimizada. A dispersão do que está sendo planejado em relação às térmicas pode estar associada com alguma falha neste conceito de seleção no LEN.

Com uma expansão planejada mais próxima das necessidades reais do sistema seria possível encontrar alteração dos produtos e procedimentos do leilão para as térmicas. A segmentação da oferta de um leilão exclusivo de térmicas por padrão de despacho é uma solução a ser considerada. A vantagem percebida seria a criação de uma ligação entre o planejamento e a licitação, sendo possível inserir neste contexto os projetos de forma regional. A solução para superar esta fragilidade é adotar um preço teto para cada fonte térmica, e o não atendimento desta restrição por determinada fonte deverá ser atendido pelas outras atendendo critério de menor preço (contestação econômica).

A competitividade dos contratos de disponibilidade oriundos das térmicas é muito influenciada pelas expectativas de despacho destas unidades, e conseqüentemente do consumo de combustíveis destas. No ambiente do leilão este processo competitivo acaba não privilegiando as fontes térmicas de base, pois as mesmas possuem uma receita fixa maior e um custo de operação menor, fazendo com que usualmente o índice de custo benefício (ICB), que captura valores médios de longo prazo, não as coloque numa boa posição de competitividade. Entretanto, deve ser reconhecido que a necessidade de uma receita fixa maior é o reflexo de um investimento maior (CAPEX) para alcançar um custo de operação menor (OPEX), que é deve ser priorizado com uma excelente fonte para a segurança no longo prazo numa matriz cada vez mais frágil com relação aos recursos da natureza (vazões, vento, safras e incidência solar). O fato é que a competição da forma que está não favorece aos investidores em térmicas de custo operação baixo e que operam na base. As fontes renováveis é uma tendência futura, porém devem ser complementadas com térmicas que ofereçam segurança aos consumidores finais.

O desafio que se apresenta é encontrar a melhor forma de especificar de forma precisa e com a competição pelo mercado (leilões públicos), o “mix” perfeito com das novas usinas térmicas e a expansão das demais fontes. A entrada de fontes térmicas não tem sido continua ao longo dos anos em cada LEN. A **Figura 3** ilustra os contratos (CCEAR) derivados dos LEN. No pico da contratação entre 2019 e 2022 o valor de 30.390 MW.médio contratado é quase 50% do mercado atual de 2015. Com certeza os LEN como indutores da expansão no Brasil representam uma experiência bem sucedida.

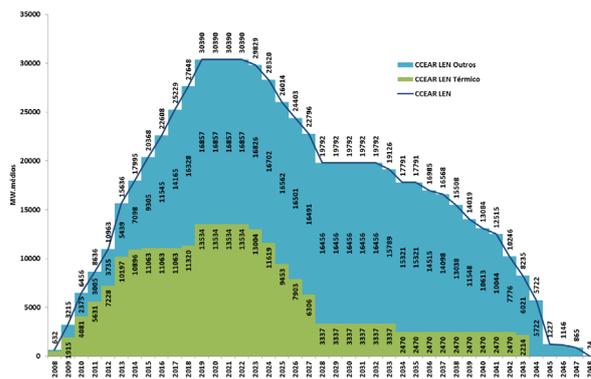


Figura 3 – CCEAR nos LEN (fonte CCEE)

As reduções a partir de 2022 na **Figura 3** representam o vencimento dos CCEAR originais, que deverão ser recontratados em modalidade (CCEAR existente ou reserva, quantidade ou disponibilidade) que ainda será futuramente definida. Da **Figura 3** também é possível concluir que a térmicas possuem um papel importante no volume total, apesar de apresentarem uma “pilha térmica”, como na **Figura 2**, ainda longe do ideal. A renovação dos contratos será uma excelente oportunidade de “trocar” as térmicas flexíveis (óleo combustível e diesel) por outras térmicas de base, como lastro futuro dos CCEAR das distribuidoras. As térmicas flexíveis fariam parte da reserva do sistema, sendo remuneradas desta forma para uso conjuntural, com contratos de disponibilidades. Entretanto esta correção de rota já deveria ser iniciar nos próximos LEN de compra de CCEAR direcionadas para térmicas de base no SIN. Com isto a “pilha térmica” tomará uma forma adequada para a segurança do sistema. Evidentemente, a correção de rota no ajuste da “pilha térmica” com a troca das flexíveis, não impede de comprar novas térmicas de base nos próximos leilões de aumento da demanda do ACR, como é usualmente realizado nos LEN. De certa forma, os próximos LEN deveriam ter 2 metas: (i) atender o crescimento de carga do ACR numa competição justa e orientada das térmicas de base com as demais fontes; (ii) atender a troca das térmicas flexíveis mais caras (diesel e óleo combustível) a partir de 2023.

A **Figura 4** ilustra o volume de CCEAR térmico contratado nos LEN até o final de 2014. Notar que o volume de térmicas flexíveis mais caras a ser substituído no futuro (após 2023) é razoável, e representa algo em torno de 5 GW.médios. A seleção das térmicas flexíveis neste trabalho se limitou aos combustíveis fósseis líquidos. Entretanto existem outras com CVU alto que poderiam ser incluídas neste mesmo contexto, com aquelas a gás natural com ciclo aberto, e/ou com eficiência mais baixa. Claro que os preços finais das térmicas ainda são mais caros que outras fontes, porém a segurança é o atributo principal das térmicas.

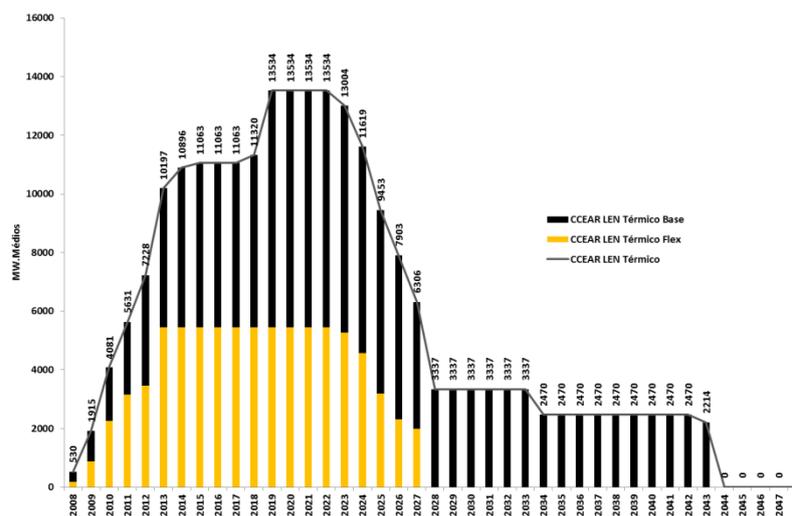


Figura 4 – CCEAR Térmico nos LEN (fonte CCEE)

O debate dos preços finais das térmicas é de fundamental importância para expansão correta via leilões públicos. O reconhecimento de um CAPEX mais alto na busca de um OPEX mais baixo das térmicas de base é um desafio. A entrada de fontes térmicas de base não tem sido contínua ao longo dos anos em cada LEN, e isto deve ser evitado para evitar sobressaltos na nova oferta térmica disponível para o SIN.

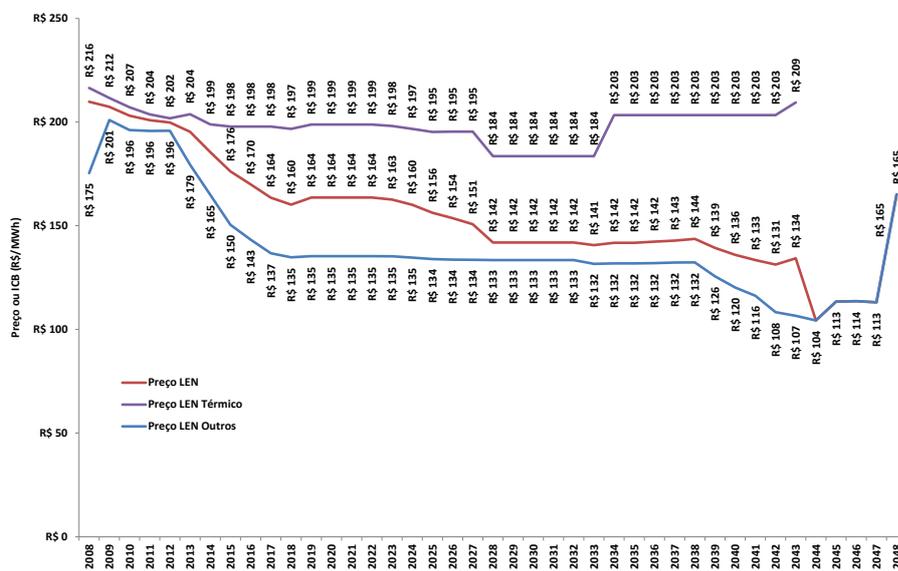


Figura 5 – Preços e ICB médios dos LEN Térmicos e Outras Fontes (fonte CCEE em R\$/MW referencia Janeiro de 2015)

O processo atual busca limitar a competição para aquelas que não se enquadrem como térmicas de base, porém a importância de um preço teto adequado não tem sido uma tônica frequente. A **Figura 5** ilustra os preços e ICB médios de todos os LEN e compara os valores com os LEN térmicos. É fácil perceber que o nível de preços equivalentes das térmicas é maior que o nível similar de preços das demais fontes. Por isso é sempre necessário diferenciar o papel de cada fonte no SIN. As térmicas possuem custo variável, que nas demais é reduzido, mas ao mesmo tempo fornecem segurança ao SIN. A comparação não pode ser só o preço final.

No último leilão de energia nova (20º LEN) finalmente foi reconhecida esta falha, e as térmicas de base foram vencedoras com 2.214 MW médios, e com um ICB médio de R\$ 209/MWh (ref. Jan/15) [1]. Neste ICB médio a receita fixa (RF) média foi R\$ 140/MWh com custos variáveis (COP e CEC) médio de R\$ 69 R\$/MWh. O investimento total previsto é de R\$ 11 bilhões (~ R\$ 3000/kW instalado). Este resultado é um bom exemplo do padrão dos projetos com térmicas de base, investimento alto (CAPEX alto), que deriva a necessidade de uma RF alta (70% do ICB), e custos variáveis mais controlados (COP mais baixos e CEC neutro). A formatação dos preços ofertados pelos investidores segue este padrão de desembolsos de CAPEX, que dependem fortemente do custo do capital e financiamentos. Reconhecer este padrão será certamente à fórmula do sucesso para que os novos projetos com as térmicas de base sejam vencedores nos LEN futuros.

O momento atual é pela priorização dos projetos com as térmicas de base, porém

algumas dificuldades para promover esta nova expansão devem ser superadas para a plena inserção destas fontes no setor elétrico. As dificuldades em grande parte se resumem em 2 tópicos importantes: fornecimento de combustíveis e licenciamento ambiental. Dentre as dificuldades do momento é possível citar os seguintes pontos: (i) a disponibilidade do gás natural nacional está sendo postergada pelas dificuldades em exploração e produção da maior produtora do Brasil, portanto a saída para o gás natural para as térmicas é amplificar a infraestrutura de novos terminais de GNL, com mais incentivos do governo; (ii) novas usinas nucleares necessitam de no mínimo 10 anos para liberar seu licenciamento, e existe limitação para aporte do capital privado em novos projetos; (iii) os projetos com carvão nacional, ou mesmo importado, sofrem duras restrições do licenciamento ambiental, que impõe vários condicionantes; (iv) as florestas energéticas são a nova tendência para termelétricas, e o licenciamento ambiental deve ser acelerado para esta tecnologia. Assim, espera-se que no futuro próximo, o governo brasileiro realize ações no sentido de sincronizar todas estas demandas e superar rapidamente as restrições como uma política pública para a expansão da geração nacional.

#### 4 | AVANÇOS SUGERIDOS - LEN

Na busca do aprimoramento dos sinais de planejamento em sincronia com a competição pelo mercado, através dos LEN, nestes deve ser sempre tentado com leilões exclusivos por fonte, segmentando inclusive as térmicas de base, mérito intermediário e as flexíveis, e por localização, quando possível. Esta segmentação seria definida antes do leilão. Os leilões da base térmica seriam feitos de forma sequencial, buscando atender a segmentações sugeridas. Para evitar a reserva de mercado para as térmicas, cada leilão de novas térmicas teria um preço teto para os combustíveis solicitados e a disputa aberta para o menor ICB (índice de custo benefício). Caso o volume segmentado para as térmicas não alcance sucesso, por falta de competidores, o LEN continua abrindo o volume reservado para o parque térmico para as demais fontes. Evidentemente isto não é o que se deseja, portanto a definição do preço teto correto é primordial.

A competição da geração térmica pode ser fomentada, através do ajuste da metodologia do custo e benefício que traz na formação do índice ICB, incluindo os benefícios das térmicas ao sistema [2]. A inclusão de benefícios agregados ao ICB não são itens que serão cobrados dos projetos, mas sim fatores que permitam realizar uma escolha mais adequada dos melhores projetos térmicos.

A nova proposta é realizar um leilão exclusivo de térmicas no início dos LEN A-3 e A-5. O montante é definido pelo MME/EPE e, caso não se alcance o volume desejado por falta de competitividade frente aos preços teto especificados, o volume não preenchido pelas térmicas é repassado para LEN tradicional A-3 e A-5. A EPE qualifica os projetos e calcula os indicadores necessários, tais como, GF, COP, CEC, e outros benefícios dos projetos [2]. Os projetos térmicos saberão antes do certame, os limites para a sua oferta final da receita fixa (RF).

Outro ponto de atenção na realização dos LEN são os dados de entrada para as simulações prévias do leilão para a definição do COP e CEC dos projetos. Apesar da introdução da metodologia do CVAr, as simulações prévias dos leilões, utilizando os dados da EPE, correspondentes ao PDEE, resultam em previsões de despachos de geração térmica em menores montantes do que os resultantes na realidade. Isto é oriundo da consideração de planos de obras muito favoráveis, e as previsões de condições hidrológicas médias no longo prazo. Com isto as térmicas mais flexíveis com despacho mínimo baixo e CVU mais alto tendem a apresentar um padrão de despacho baixo, desonerando o atributo COP, que é decisivo para a seleção dos projetos térmicos nos LEN.

A melhor forma de encontrar uma base de dados mais coerente é realizando uma filtragem realista dos dados de previsão de entrada da nova oferta, assumindo apenas aqueles com maior chance de comissionamento no prazo imaginado pela EPE. Neste caso, para avaliação dos parâmetros COP e CEC, a base de dados deveria se limitar a sequência de hidrelétricas planejadas, dado que esta sequência é necessária para os leilões de concessão. As demais ofertas planejadas – térmicas e renováveis - não seriam consideradas nas simulações prévias do leilão. Com isto se estaria maximizando o papel da entrada de cada oferta na matriz tentando obter uma previsão do COP e CEC mais próximas do limite operacional de cada fonte.

Lembrando, que os parâmetros COP e CEC são utilizados na seleção dos projetos nos LEN, e não servem como base de despesas ou receitas nos contratos de disponibilidade. Sendo assim, os casos simulados neste contexto teriam como foco a seleção dos melhores projetos do ponto de vista da segurança em situações limite do SIN. A intenção é explorar ao máximo a competitividade de cada fonte térmica no que estas têm de melhor para o SIN - segurança com razoabilidade de custos para o consumidor final.

## CONCLUSÕES

Este artigo busca debater e apresentar propostas que respaldem a necessidade de térmicas de base no SIN, com argumentos técnicos e perspectivas futuras. A busca do aprimoramento dos sinais de planejamento deve estar em sincronia com a competição pelo mercado, através dos LEN. Desta forma, esta proposta ora oferecida pelos autores resulta em ganhos em segurança energética do sistema obtidos com seleção das térmicas de base.

Uma dificuldade no Brasil para a expansão das térmicas de base é a cultura equivocada estabelecida no setor na busca única e exclusiva pela modicidade tarifária. O correto balanço entre custos finais ao consumidor, bem como sua segurança no abastecimento, tem sido de certa forma negligenciado e o sistema fica cada vez mais vulnerável as variações da natureza (vazões, vento, safras e incidência solar). Os anos recentes com a segurança no abastecimento em risco desde 2012, apesar de todas as térmicas disponíveis estarem gerando ao máximo, demonstram um desequilíbrio estrutural na matriz brasileira. Isto resultou em custos altos com um despacho térmico constante de projetos com custos unitários muito acima do razoável, e um preço de curto prazo (PLD) em patamares altos durante um longo

tempo. Uma matriz adequada deveria ser capaz de evitar que o SIN chegasse nesta situação crítica, na qual os custos ao consumidor final estão excessivamente altos. O papel das térmicas de base é exatamente este.

Os autores propõem que os próximos LEN deveriam ter 2 metas complementares: (i) atender o crescimento de carga do ACR com as térmicas de base numa competição justa e orientada com as demais fontes; (ii) atender a troca das térmicas flexíveis mais caras (diesel e óleo combustível) a partir de 2023.

Esta troca dos contratos entre as fontes térmicas flexíveis e futuros projetos com térmicas de base devem se iniciar em 2017/18 para que os novos investidores possam preparar suas melhores ofertas, com base nos combustíveis e tecnologias previstas.

No caso dos próximos LEN para atendimento ao crescimento do mercado ACR, os autores sugerem alguns avanços, de forma que se possam comprar os blocos térmicos corretos para segurança do SIN. Neste sentido, visando aprimorar os sinais de planejamento em sincronia com a competição através dos LEN, devem ser priorizados para o bloco térmico leilões exclusivos por fonte, segmentado em base, mérito intermediário e flexível, e por localização, quando possível. A competição da geração térmica correta pode ser fomentada, através do ajuste da metodologia do custo e benefício incorporado na formação do índice ICB, incluindo os benefícios das térmicas ao sistema. Com certeza os LEN como indutores da expansão no Brasil representam uma experiência bem sucedida, e avanços nesta fórmula para as térmicas de base vão garantir cada vez mais o sucesso desta abordagem de competição pelo mercado de longo prazo.

## REFERÊNCIAS

CCEE, Resultado consolidado dos leilões - 03/2015, <http://www.ccee.org.br/>.

T. M.Prandini, R.F.B. Viana, G. Rocha, S.Grynwald, J.C.O.Mello, “As Térmicas e o Gás Natural – Expansão, Segurança e Preços”, XXII SNPTEE, 2013

Matos, V.L. , “Formação de Preço considerando metodologia de aversão a risco com CVaR no Brasil”, , UFSC, III SINREM, São Paulo, 2012.

CNPE, Resolução nº 03/2013, 2013

EPE, “PDEE - Plano Decenal 2023”, 2014

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

## UMA VISÃO DE MERCADO NA GESTÃO DE RISCOS DE CONSUMIDORES ELETROINTENSIVOS - MELHORES PRÁTICAS

Data de aceite: 02/06/2020

**João Carlos de Oliveira Mello**  
THYMOS ENERGIA

**Camila Câmara Lourenço**  
THYMOS ENERGIA

**Rodrigo Viana**  
THYMOS ENERGIA

**Rogério Catarinacho**  
UNIPAR CARBOCLORO

**Nicolas Jardin Jr.**  
UNIPAR CARBOCLORO

**RESUMO:** As melhores práticas de gestão de energia são necessárias para incorporar o perfil de risco do Consumidor Livre e suas metas no Ambiente de Contratação Livre. Este artigo busca oferecer uma descrição das práticas de gestão de risco do Consumidor Livre, dado um perfil de aceite ao risco. São apresentados casos práticos com a experiência dos autores na condução desta realidade de gestão de energia perante consumidores livres e demais agentes do ACL. O objetivo é discutir de forma orientada vários pontos de reflexão, considerando cenários estratégicos de contratação de energia. O artigo foca casos reais de gestão com a Unipar Carbocloro, que é

uma indústria eletrointensiva que necessita de energia competitiva e inclui os aspectos mais importantes de movimentos reais já realizados: (i) Foi pioneira na abertura de seu consumo de energia no ACL em 1998; (ii) Investiu e realizou sua migração para Rede Básica, buscando segurança e redução de custo.

**PALAVRA-CHAVE:** Risco; Oportunidades; Melhores Práticas; Competitividade; Mercado Livre.

### 1 | INTRODUÇÃO

O modelo do setor de energia elétrica brasileiro, instaurado pela Lei 10.848/04, é dividido em dois ambientes de contratação de energia: o Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Neste contexto, o Consumidor Livre (CL) tem a possibilidade de buscar a diversificação de seu portfólio de contratação de energia.

Dessa forma, visando garantir as metas de redução de custo com energia elétrica planejada, o CL possui uma nova atividade no seu escopo de trabalho, que é a **gestão de energia**. A gestão de energia no ACL é

uma atividade que requer comprometimento e atenção, tanto do ponto de vista operacional com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, observando os prazos que regem as operações no mercado, quanto do ponto de vista estratégico, para acompanhar os movimentos de mercado e as alterações das regras vigentes. Estes são os requisitos operacionais de um CL, porém o universo é mais amplo, dado que necessário incorporar também uma “inteligência” de mercado. O ACL é um mercado muito mais ágil do que o ACR, onde a única ação é receber e pagar a fatura da Distribuidora a cada mês.

A opção do consumidor ao migrar para o ACL é pela previsibilidade de uma parcela de seu custo de energia elétrica, que é a energia comprada de terceiros no mercado, comparável a tarifa de energia (TE) da sua situação como cativo. As demais parcelas “fio” e “encargos” são tarifas reguladas pela ANEEL. No caso de consumidores especiais, com capacidade de consumo menor que 3 MW, a sua liberdade de compra se limita as fontes incentivadas (novas renováveis), em compensação recebem o benefício do desconto na parcela “fio”. Em suma, o ACL é um mercado atraente, que possibilita ao usuário o domínio de parte significativa do seu custo com energia elétrica, mas existem riscos. O ACL é um mercado em que o consumidor é livre para errar e acertar!

As melhores práticas de gestão de energia são necessárias para incorporar o perfil de risco do CL e suas metas no ACL. O mercado de energia não é “neutro” em termos de risco, entretanto os resultados alcançados podem ser muito atraentes, mesmo incorporando algum risco controlável. A **gestão da energia** é o ponto de equilíbrio entre as metas previstas de um portfólio de contratos no ACL versus a sua operação no tempo real. A **Figura 1** ilustra a gama de riscos que o consumidor no ACL está envolvido, porém é possível afirmar que todos aqueles sobre controle do consumidor são gerenciáveis. As parcelas do custo final de energia, que não dependem apenas do consumidor, mas das tarifas definidas pela ANEEL ainda é uma janela aberta para incertezas nos custos dos consumidores finais.

Este artigo busca oferecer uma descrição das melhores práticas de **gestão de energia** e sua sincronia com o avanço da regulação do ACL. São apresentados casos práticos com a experiência dos autores na condução desta realidade perante os consumidores livres eletrointensivos e demais agentes do ACL.

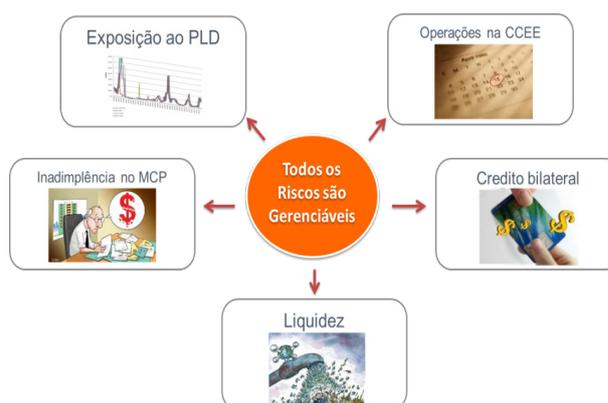


Figura 1 - Riscos da Gestão no ACL

## 2 | O POSICIONAMENTO DO CONSUMIDOR LIVRE NO ACL

O mercado de energia abre um novo e desafiador ambiente de negócios para o consumidor livre. Estas estratégias buscam comparar opções como a continuidade de fornecimento pela sua própria distribuidora, através de tarifas reguladas do mercado cativo; contratação de novos contratos de comercialização no ACL (CCEAL) de outros geradores ou comercializadores; comercialização complementar via transações no MCP; e as opções de investimento em autogeração remota ou através de construção de cogeração.

As negociações no ACL possuem algumas práticas de mercado, que são dominadas em grande parte pela contratação de energia a termo através dos contratos bilaterais. O mercado de oferta de contratos bilaterais é formado pelos geradores e comercializadores. A concorrência e a busca por maior retorno nos processos motivou os grandes consumidores a migrarem para o ACL de forma a obterem reduções significativas da parcela energia na matriz de insumos que compõem o custo do produto energia elétrica.

### 2.1 Gestão de Energia – Requisitos e Melhores Práticas no ACL

As incertezas e a complexidade do Setor Elétrico e seu mercado atual exigem o desenvolvimento de capacitação estratégica e gestora por parte dos agentes de consumo, o que inclui necessidade de:

- Conhecimento atualizado do modelo regulatório, bem como de seus riscos, desafios e oportunidades;
- Monitoramento permanente dos preços de mercado e projeções futuras;
- Perspectiva comparativa do mercado ACR e ACL, além de capacitação analítica e organizacional para aquisição e comercialização de energia.

Todos os agentes de mercado buscam posições mais competitivas de preço com redução de custos de aquisição da energia elétrica, sem prejuízo da qualidade e confiabilidade do suprimento. O processo decisório inclui:

- Decidir entre investir em nova produção ou contratar;
- Decidir quando investir, onde e em que tipo de geração;
- Decidir quando contratar, com que duração, quando e de quem;
- Decidir qual é seu nível suficiente de participação no mercado de autoprodução e a necessidade de construção de capacidade excedente;

Como alternativas para garantia do suprimento a preço competitivo, os agentes podem celebrar contratos bilaterais de compra e venda de energia, mediante realização de negociações bilaterais ou leilões públicos com Energia Existente e/ou Nova, e no caso de investimentos em geração são apresentadas alternativas como: (i) construção de usinas com concessão ou autorização do regulador; (ii) compra de ativos existentes ou (iii) soluções locais de consumo e exportação, como por exemplo cogeração. Para a seleção das alternativas

no setor existem motivações que devem ser analisadas para a tomada de decisão, quais sejam: (i) Menor Custo Final e/ou Preço; (ii) Confiabilidade de Suprimento; (iii) Estratégias de Longo Prazo para o Negócio; (iv) Capacidade de Investimento em geração própria visando a proteção das Posições Comerciais de seu produto eletrointensivo.

Este é um processo minucioso que exige o monitoramento constante dos consumos, sua comparação com a oferta disponível no mercado e os demais contratos existentes do CL. A **gestão de energia** deve ser feita em vários horizontes com diferentes objetivos e níveis de incerteza das variáveis envolvidas. As decisões são paulatinamente revistas e atualizadas, sempre que possível, numa sequência de avaliação, como se segue:

- [i] *Planejamento de Longo prazo*: neste horizonte o balanço energético é obtido a partir de uma análise estratégica das opções de oferta e dos cenários futuros de consumo, incluindo possíveis expansões, do CL. A partir de uma previsão do balanço energético, a nível mensal, serão produzidas alternativas de fornecimento de energia, junto com uma análise econômico-financeira de todas estas alternativas. Tendo em vista que esta avaliação deve envolver decisões de longa maturação (investimentos ou contratos de longo-prazo) uma análise de riscos deve ser aplicada para a seleção da alternativa mais robusta.
- [i] *Planejamento de Médio prazo*: num horizonte anual o balanço energético é obtido a partir de uma análise das opções de oferta já disponíveis e das previsões de consumo do CL naquele ano.
- [ii] *Planejamento da Operação*: no horizonte de um mês à frente o balanço energético mensal é obtido com os recursos disponíveis e uma previsão atualizada do consumo do CL para aquele mês. Será definida uma *estratégia* de uso dos recursos disponíveis para o mês seguinte, e as decisões tomadas serão utilizadas como meta para a operação do mês seguinte.
- [iii] *Operação e Registro*: ao longo do mês são acompanhadas as decisões de utilização dos recursos e atualizadas as previsões de consumo, visando consolidar junto a CCEE as posições finais de *uso* destes recursos frente às medições de consumo verificadas. Esta fase incorpora o registro oficial das posições do CL perante CCEE.

## 2.2 Gestão de Energia – Práticas em Uso

Como consequência da aplicação das melhores práticas de gestão, o resultado dos agentes deverá estar em consonância com as metas esperadas. As ações necessárias correspondem a eventos rotineiros de acordo com os procedimentos de mercado. O processo decisório envolve uma periódica reavaliação das posições frente ao mercado e suas expectativas. A principal decisão é a aquisição de posições de compra ou venda de contratos.

- Sazonalização, Flexibilidade e Modulação.
- A sazonalização, flexibilidade e modulação são de extrema importância para a

contratação e a operação do consumidor livre, dado que podem provocar exposições voluntárias ou involuntárias no MCP. A sazonalização de contratos do CL é feita até o final de novembro de cada ano para o ano seguinte. A sazonalização é o processo pelo qual o valor anual de energia dos contratos é distribuído em valores mensais, de acordo com o perfil de carga do Agente (previsão). A cada mês, considerando os montantes mensais contratados definidos após a sazonalização, o volume de energia a ser registrado e faturado ainda pode sofrer variação, desde que respeite os limites definidos em contrato (flexibilidades). A modulação é o processo pelo qual os valores mensais de energia do contrato (volume a ser faturado, após aplicação das flexibilidades) são distribuídos para cada hora do mês.

- **Contratação e Penalidades**
- A gestão da contratação de energia e a cobertura à exposição no MCP são pontos fundamentais para o CL. A insuficiência de lastro do consumo é uma prática que é monitorada constantemente e exige uma média móvel de 12 meses com 100% lastro. Caso contrário o CL fica sujeito às penalidades da CCEE pela falta de lastro.
- Outro ponto de atenção é o aporte de garantias financeiras, que avançou recentemente com o intuito de minimizar o risco financeiro do mercado. A Garantia Financeira é calculada como o valor total das exposições negativas na pré-contabilização financeira mensal de cada agente, acrescidas de 5%. O agente, cuja apuração das exposições financeiras resultar em valor positivo, fica isento de aporte de Garantia Financeira. Os agentes que não aportarem as Garantias Financeiras de forma total terão parte de seus contratos invalidados pró-rata ao valor aportado. Isto vale para o lado comprador e vendedor. Caso um agente que comercializou não tenha lastro – ou seja, se não tiver contratos comprados ou geração própria para assegurar que aquela energia possa ser efetivamente liquidada – e nem garantias financeiras depositadas no montante estabelecido, os registros por ele realizados poderão ter sua eficácia suspensa, total ou parcialmente, para evitar riscos de inadimplência para o mercado. Caso o vendedor venha a ter a eficácia de registros suspensa, os respectivos compradores passarão a ter a obrigação de efetuar o pagamento de eventual exposição. Consumidores impactados pela perda de efetividade do registro de contratos poderão fazer a recomposição do lastro no mês seguinte para que não sejam penalizados devido ao déficit de lastro na média móvel. Isto impõe que os agentes compradores de energia elétrica passem a selecionar com mais cuidado com quem vão negociar, uma vez que o risco passa a ser bilateral entre as partes. Em outras palavras, o mercado não garante mais o lado comprador, que tem um contrato fornecido por vendedor sem lastro comercial e garantias. A qualidade do vendedor de contratos bilaterais é também uma preocupação do comprador CL.
- **Registros e Eventos na CCEE**
- Os registros e eventos na CCEE para os CL são realizados “ex-post”, ou seja, após a realização do consumo. Isto inclui a consolidação da medição do mês anterior vis a vis os seus contratos bilaterais disponíveis naquele momento. O balanço de sobras e déficits do consumidor pode implicar num processo de compra ou venda no curto/médio prazo, para ajuste da posição do consumidor perante CCEE.
- **Simulação de Posições a Termo**

O processo decisório para a contratação de posições a termo deve ser sempre acompanhado por um modelo de riscos. Para a simulação da contratação a termo de longo prazo são usualmente consideradas algumas agregações (clusters) com diferentes durações para análise: (i) Spot – contratos assinados mensalmente com influencia do PLD; (ii) Curto – contratos até 2 anos; (iii) Médio – contratos de 3 a 5 anos; (iv) Longo - contratos maiores que 5 anos. A formação dos preços nos contratos segue uma lógica como aquela apresentada na **Figura 22**. Notar que, os indicadores de tendências de preços em contratos futuros são variáveis ao longo do tempo.

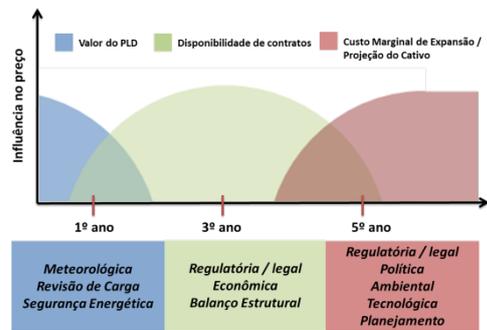


Figura 2 – Formação de Preços nos Contratos

Com os preços especificados para os contratos de diferentes durações, devem ser incluídas também as tendências nos momentos de renovação, de forma a capturar os riscos de contratos de duração menor versus os de longa duração com as diferentes tendências nos preços reais na renovação e a correção anual pela inflação. As tranches de cada portfolio são definidas pelo usuário e são enumeradas as alternativas para comparação. Os valores de preços reais equivalentes são obtidos para diferentes níveis de risco (VaR) e o usuário deve fazer uma análise de custo/benefício com base nos riscos envolvidos e sua aversão ao risco.

- Previsão do PLD – Práticas do Mercado

De certa forma a simulação do PLD de longo prazo é usual, mas a sua utilização após os 12 meses é muito mais de tendência do que valor absoluto. As estimativas futuras de PLD na CCEE são obtidas em consonância com as diretrizes estabelecidas nas Regras e os Procedimentos de Mercado aprovados. A prática de mercado não considera o cálculo de preços semanais futuros, e para a análise de estimativas futuras são realizadas apenas análises com discretização mensal. As incertezas são muito grandes para uma simulação semanal confiável, dado que conforme os procedimentos de rede do ONS, os dados de entrada do modelo são ajustados com uma alta frequência. O programa utilizado para esta avaliação de preços é o NEWAVE, programa oficial da cadeia de programas de cálculo de preços na CCEE. A utilização de um programa como o NEWAVE, com menor nível de detalhamento do sistema e com um número de cenários de investigação maior, tem sido uma

praxe no mercado. A partir das condições de atendimento ao mercado do Sistema Interligado Nacional (SIN) para as 2000 séries sintéticas de energias afluentes, na visão do ONS e de acordo com o Plano Mensal de Operação (PMO) do mês corrente, calcula-se a distribuição de preços de curto e médio prazo nos submercados de interesse através dos seguintes passos:

- Obtenção dos preços de liquidação de diferenças (PLD) da CCEE, através dos custos mensais de operação (CMO) obtidos no modelo NEWAVE, no período futuro de interesse, dado em R\$/MWh, e considerando os limites mínimo e máximo para o preço PLD da CCEE;
- Os valores são calculados por mês do período de interesse refletindo uma média dos valores semanais a serem alocados em cada mês;
- Montagem da distribuição de probabilidade por mês associada ao PLD da CCEE obtido com apoio do programa NEWAVE.

De posse das previsões futuras do PLD, os agentes podem fazer suas decisões de avaliação dos preços dos contratos no curto prazo. O mercado deve reconhecer que a prática de previsão é uma sistemática técnica com uma série de fatores que podem alterar as expectativas do PLD. Quanto mais à previsão se afasta do momento inicial da simulação, maiores são as incertezas e pior é deve ser a qualidade da estimativa. Existem fatores endógenos, como a hidrologia, que são conhecidos como importantes e são modelados na simulação. Este é um fator que possui uma modelagem criteriosa, fruto da longa experiência do setor nacional, e que ainda sofre um processo de acompanhamento contínuo no ONS. Existem fatores exógenos, que também são importantes, e por isso seguem procedimentos para consolidação das premissas na simulação oficial. Estes fatores incluem a nova oferta no prazo, com controle da fiscalização da ANEEL, que pode ser proveniente de um atraso na construção e/ou de licenças ambientais atrasadas. O crescimento do mercado também é adotado com critérios pelo ONS em conjunto com a EPE.

### **3 | OS REQUISITOS DE COMPETITIVIDADE DA INDÚSTRIA ELETROINTENSIVA**

A Unipar Carbocloro é uma indústria eletrointensiva produtora de cloro-soda, que necessita de energia competitiva. Tendo este objetivo como meta principal, a Unipar Carbocloro já realizou movimentos no mercado brasileiro: (i) foi a pioneira na abertura de seu mercado de energia ao ACL, ao se tornar consumidor livre em 1998/99, o que permitiu ganhos reais frente ao mercado regulado com negociação de seus contratos no ACL; (ii) investiu e realizou sua migração para Rede Básica em 2004 para melhorar a qualidade de atendimento e alcançar a redução de custos. Desde o início do processo competitivo no mercado de energia elétrico brasileiro existe uma integração total da gestão operacional, hoje realizada pela Thymos Energia, com a corporação do cliente Unipar Carbocloro, que busca traçar as melhores estratégias e operações no mercado de energia elétrica. Nesse sentido, a empresa já tomou uma série de medidas a seu alcance para redução do custo final de energia, incluindo investimentos da corporação, no entanto, a competitividade na energia

é uma busca permanente.

A Unipar Carbocloro reconhece que não basta comprar bem, mas operar bem também é uma obrigação. Uma série de ações entre o planejamento, a operação dos contratos de energia e o consumo em tempo real, são compartilhadas como as que seguem: (i) Desenvolvimento de políticas de exposição ao risco financeiro no mercado de curto prazo; (ii) Limites financeiros e custo dos aportes de garantias; (iii) Montagem de portfólio de contratação de curto e médio prazo em complemento ao contrato base; (iv) Políticas contratuais e legais do grupo; (v) Complementação do processo produtivo – caldeiras elétricas; e (vi) Orçamentação das despesas com energia elétrica.

### 3.1 Compra de Contratos

A Unipar Carbocloro está sempre buscando uma estratégia comparativa para as questões do mercado elétrico emergente e as oportunidades do negócio. A aquisição de energia elétrica considera cenários estratégicos incluindo todos os fatores relevantes: (i) Volume e duração da compra – portfólio de contratos – e possíveis expansões; (ii) Parâmetros operacionais – flexibilidades, garantias, faturamento, etc.; (iii) Começo do processo de compra e quais os fornecedores; (iv) Estimativas de preço de compra de energia para diferentes fornecedores potenciais. A solução autoprodução está sempre sendo avaliada pela corporação como uma solução de longo prazo para o negócio.

A Unipar Carbocloro sempre começa seu processo de compra bem antes do vencimento e em sincronia com as melhores oportunidades. O primeiro período de contratação de fornecimento teve a duração de cinco anos, de outubro de 1999 a setembro de 2004. O segundo teve uma duração de dez anos, de outubro de 2004 a setembro de 2014. Nota-se que, a contratação de longo prazo em preços competitivos e previsíveis é uma tônica. O terceiro período de contratação foi estudado intensamente, se iniciou em 2010 e foi finalizado ao final de 2012. Apesar do vencimento em 2014, a contratação para renovação foi concluída ao final de 2012. O monitoramento contínuo das oportunidades desde 2010 indicou aquela janela de tempo como a preços futuros mais competitivos.

A definição do portfólio de compra de novos contratos para 2014 em diante, seguiu um processo de seleção com base em cenários futuros e suas tendências de preços. A questão da correção do preço do contrato com a indexação pela inflação levou a corporação Unipar Carbocloro a debater profundamente a duração do contrato futuro. A simulação do portfólio de contratos futuros considerou as seguintes possibilidades de prazos de contratos:

- Spot - Contratos assinados mensalmente no mercado à vista
- Curto - até 3 anos
- Médio – de 3 a 5 anos
- Longo - mais de 5 anos

Na avaliação do portfólio de contratos futuros para a Unipar Carbocloro, que possui um

alto volume de consumo no ACL (14º maior), foram adotadas as seguintes premissas:

- Previsão das Tendências do PLD Futuro - simulação de dados oficiais de planejamento operacional (ONS) e expansão (EPE) de 2012-2024;
- Ajuste dos parâmetros de entrada do cálculo de PLD futuro (cambio nos custos das térmicas);
- Preços de mercado para contratos curto, médio e longo prazo, utilizando o banco de cotações da Thymos Energia para com outros agentes, considerando a indexação – IGPM
- Preços comparativos sem impostos (PIS/COFINS e ICMS)
- Proxy do “spread” de mercado no preço do spot com base no PLD futuro

O período total de análise foi de 10 anos com encaixes de contratos de 3, 5 e 10 anos. As renovações recorrentes naqueles de menor duração foram realizadas utilizando a estrutura de árvore, conforme ilustrado na **Figura 3**. As tendências otimista, base e pessimista de preços de novos contratos no momento das recontrações são obtidas das estimativas de preços futuros com o PLD. Evidentemente, as estimativas futuras do PLD estão impregnadas de incertezas, porém o que capturado para efeito da avaliação de portfólio é a possibilidade de aumento das tendências de preço no final do contrato – aumento no cenário pessimista, continuar na mesma base, e redução no cenário otimista.

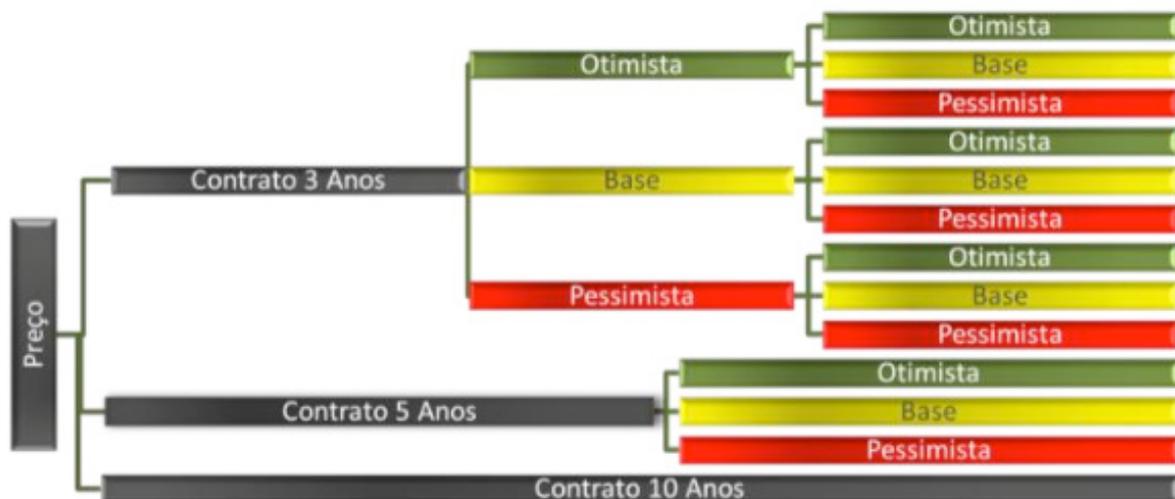


Figura 3 – Arvore de Cenários de Contratação – Simulação do Portfólio

Considerando os quatro possíveis perfis de contratos de avaliação de portfólio (spot, curto, médio e longo) foram considerados 56 possíveis portfólios de contratos, sendo cada partição do conjunto de no mínimo de 20% do total. A Figura 4 ilustra a combinação dos contratos e cada cenário do portfólio de contratação.

A seleção do portfólio leva em conta a análise risco-benefício (VaR) de cada um dos cenários considerados na Figura 4. Após as simulações iniciais do portfólio futuro foram adotadas outras restrições na composição por uma questão estratégica da corporação, considerando os riscos (VaR) e as oportunidades de compra naquele momento.

Foram admitidos apenas cenários de portfólio com no máximo 20% de exposição no spot e a opção de uma parcela em 10 anos foi considerada fora de cogitação. A Figura 5 ilustra os resultados finais analisados e a comparação entre eles em termos de eficácia econômica (média) e riscos associados percentis 5 a 95%.

Com base neste resultado, a Unipar Carbocloro com apoio da Thymos Energia foi ao mercado solicitando proposta com base nestes 5 cenários. Ao final a composição final ficou com 20% no mercado spot, apenas conjunturalmente, com a soma de atratividade de preço de energia combinado com uma produção variável num mercado muito atraente para a produção. A parcela firme de consumo ficou com a combinação 40% e 60% para contratos de 3 e 5 anos.

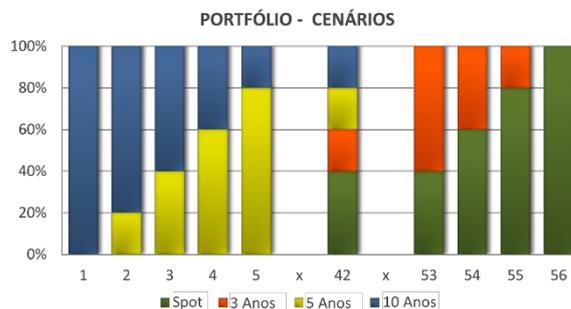


Figura 4 – Cenários de Simulação do Portfólio

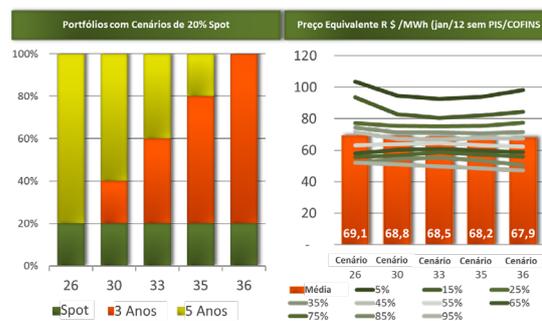


Figura 5 – Simulação dos Portfólios Finais Selecionados

### 3.2 Rede Básica

A Unipar Carbocloro se situa no município de Cubatão-SP, na área atual de concessão da Distribuidora CPFL Piratininga, e a sua conexão original era na rede de 88 kV desta concessionária. Entretanto, a expansão de 50% da carga, em consonância com a necessidade de redução do custo da tarifa de transporte (“fio”) e uma qualidade de fornecimento ainda

melhor, levou a corporação a investir no acesso à Rede Básica. Este acesso foi realizado em 230 KV em 2004, com uma seccionamento e nova subestação colocada à disposição da CTEEP. Este movimento liberou mais espaço para outros usuários na rede da CTEEP e ao mesmo tempo alcançou a meta da Unipar Carbocloro, redução de custos com qualidade. Claramente um processo “ganha-ganha” para o setor elétrico e a Unipar Carbocloro.

Os investimentos nos novos ativos para a conexão em 230 kV foram todos realizados pela Unipar Carbocloro, com cessão para a CTEEP dos ativos de Rede Básica, como previsto na regulamentação. O custo evitado com o pagamento da TUST ao invés da TUSD da concessionária local, frente aos investimentos realizados se compensou largamente, mostrando o acerto da Unipar Carbocloro. A Figura 6 ilustra os avanços na configuração da conexão.

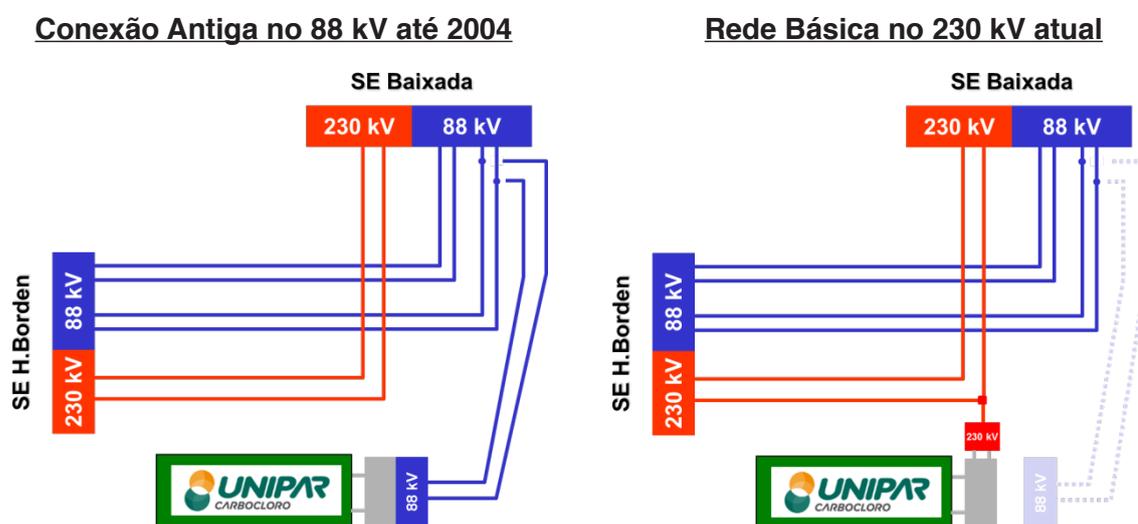


Figura 6 – Avanços na Conexão da Unipar Carbocloro

A Thymos Energia auxilia a Unipar Carbocloro na sua gestão da demanda, perante o ONS e a CTEEP, além de realizar a verificação dos pagamentos a todos os transmissores e suas faturas, provenientes do CUST (Contrato de Uso da Transmissão).

### 3.3 Relacionamentos no Mercado de Energia Elétrica

Os relacionamentos no mercado de energia elétrica da Unipar Carbocloro são complexos e incluem diversos pagamentos de conexão, transmissão, encargos setoriais, contratos com fornecedores de energia, encargos do mercado (ESS, Perdas, EER, entre outros), exposição no mercado de curto prazo (MCP), como ilustrado na **Figura 7**. A Thymos Energia atua em total sincronia com a corporação nos processos decisórios e realiza uma série de atividades operacionais, tais como estruturação de pagamentos aos transmissores, registro de contratos, e verificação e apuração dos resultados na CCEE, como na **Figura 7**. Este é um processo complexo que segue procedimentos de mercado “just in time” e poucas falhas são admitidas.

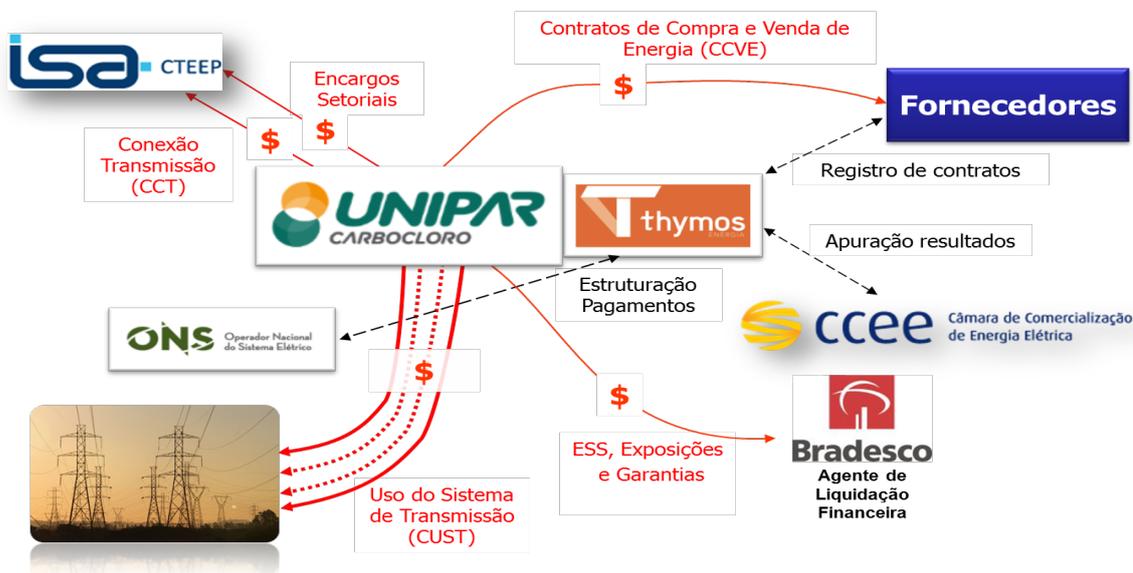


Figura 7 – Relacionamentos da Unipar Carbochloro com o Mercado de Energia Elétrica

## 4 | CONCLUSÃO

Este artigo descreve a importância da gestão de energia com um consumidor eletrointensivo, como a Unipar Carbochloro. A corporação acredita que o consumidor livre foi um conceito introduzido no setor elétrico mundial, que busca na competição justa a sua meta de controle de preços. A flexibilidade operativa e comercial que o mercado livre reserva aos consumidores possibilita um aperfeiçoamento dos processos de aquisição e uso de energia num processo de gestão; o que com certeza, sempre tenderá a uma redução intrínseca de custos e um aumento de competitividade da indústria nacional.

No ACL toda a gestão de risco é do agente, incluindo dentre outros, os preços, prazos e volumes a serem contratados. Aplica-se aqui a máxima “livre é livre para acertar e errar”. Entretanto para que exista uma real gestão de riscos no ACL devem existir condições de oferta e ferramentas apropriadas. A exposição ao risco do ACL não é o foco do problema, porém as condições de contorno para a sua gestão são necessárias.

A Unipar Carbochloro fez todas as ações a seu alcance para redução do custo final de energia com investimentos da corporação e estratégias arrojadas de contratação de energia, sendo o 1º consumidor livre. Apesar destes esforços, um novo cenário com mitigação de distorções e busca de eficiência é necessário para sustentabilidade dos eletrointensivos na indústria nacional. No entanto, a saída é uma política industrial com medidas mais relevantes e mudanças estruturais em toda a cadeia, de forma a tornar o preço efetivamente competitivo para a indústria eletrointensiva.

## REFERÊNCIAS

“O Posicionamento dos Grandes Consumidores no Novo Mercado Energético Brasileiro”, E. Spalding, C.C. Sá Jr., J.C.Mello, F.Spalding, XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.

“Certificados de Energia trazendo Liquidez para Comercialização no Mercado Livre (ACL)”, T.M.Prandini, J.C.O.Mello, XXI SNPTEE, Florianópolis, 2011.

“” As Melhores Práticas no Mercado Livre com o Avanço das Regras de Mercado. J.C.Mello R.B. Viana XXII SNPTEE Brasília, 2013.

## CONTROLE SIMPLES E ROBUSTO PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS ATRAVÉS DO MOVEIT

Data de aceite: 02/06/2020  
Data de submissão: 05/02/2020

### Kaike Wesley Reis

Universidade Federal da Bahia  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/0566221555180240>

### Rebeca Tourinho Lima

SENAI Cimatec  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/5336498098446706>

### Marco Antonio dos Reis

SENAI Cimatec  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/5861154602467728>

**RESUMO:** Os avanços tecnológicos se tornaram mais rápidos e constantes na última década. Neste cenário, a robótica vem desempenhando cada vez mais o papel de produzir autônomos capazes de substituir o homem em tarefas repetitivas ou perigosas. Dado o atual contexto a busca por soluções práticas e robustas se tornaram necessárias para acompanhar este ritmo. Esse artigo objetiva apresentar a ferramenta MoveIt! para a modelagem de manipuladores, utilizando o modelo Manipulator-H, através da criação de

um pacote de controle inédito, de código aberto e documentado. Apresenta também um benchmarking para escolher a melhor opção de planejador. Ao final é disposta a melhor solução encontrada de acordo as métricas estabelecidas acompanhado do acesso para o pacote desenvolvido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica, ROS, MoveIt, Manipulator-H.

### AN EASY AND ROBUST CONTROL FOR ROBOTIC MANIPULATORS THROUGH MOVEIT

**ABSTRACT:** Technological advances have become faster and more steady over the last decade. In this scenario, robotics is increasingly playing the role of producing autonomous devices capable of replacing man in repetitive or dangerous tasks. Given the current context, the search for practical and robust solutions has become necessary to keep up with this pace. This article aims to introduce the *MoveIt!* for manipulators control using the Manipulator-H model by creating an unpublished, open source and well documented control package. It also features a benchmarking to choose the best planner for this model. At the end, the best solution is found according to the established metrics followed by the package

online access.

**KEYWORDS:** Robotics, ROS, MoveIt, Manipulator-H.

## 1 | INTRODUÇÃO

Na última década, avanços em diversos campos tecnológicos se tornaram cada vez mais crescentes: serviços de táxi aéreo sendo testados na Alemanha [1], carros autônomos sendo desenvolvidos por diversas companhias (com destaque a Tesla) e o grande avanço dos métodos de inteligência artificial, como o mais conhecido *Deep Fake* [2], exemplificam essa realidade que pode impactar profundamente a economia global. A robótica, por sua vez apresenta uma vanguarda mais direcionada para a criação de robôs autônomos para diferentes tipos de funções sejam elas industriais ou domésticas.

Dado esse intenso avanço, o objetivo desse artigo é apresentar uma modelagem computacional para manipuladores baseada no *MoveIt!* [3], *software* que apresenta uma solução simples e robusta para esta problemática. Além disso, será demonstrado a utilização do *benchmarking*, uma de suas ferramentas para escolher um planejador de trajetória para o *Manipulator-H*.

A criação deste artigo possui ainda o intuito de apresentar a facilidade proporcionada por tal aplicação, permitindo que novas pesquisas sejam voltadas para a criação de soluções para problemas ainda existentes. Além disso, existe o intuito de diminuir a ausência de materiais explicativos direcionados para essa área no idioma nacional ou até mesmo em inglês, que apresenta um conteúdo disperso em diferentes vídeos e fóruns. Outro ponto a se destacar, é a escolha da linguagem *Python* para o desenvolvimento do pacote, que apesar de ser uma linguagem mais simples e ainda robusta não apresenta grande aderência na comunidade do *MoveIt!* que ainda utiliza bastante de soluções com a linguagem *C++*.

### 1.1 Controle para manipuladores

O controle de manipuladores objetiva de modo geral mover o *end-effector*, ferramenta ou parte mais externa de um braço robótico, para uma posição desejada no espaço de trabalho através da manipulação das posições das juntas, articulações responsáveis pela movimentação do robô [4]. Para conquistar essa meta, a interação entre três processos principais: cinemática direta, cinemática inversa e planejamento de trajetória é necessária.

A cinemática direta constitui o processo mais simples e trata da solução da posição e orientação para o *end-effector* do manipulador no espaço dado a posição das juntas. Dado sua simplicidade, sua solução é padronizada através da convenção de Denavit-Hartenberg [4], função que apresenta como parâmetros de entrada as características construtivas do manipulador e retorna a cinemática do mesmo. Já a cinemática inversa é um problema oposto ao da cinemática direta e se trata do cálculo das posições das juntas para uma posição e orientação qualquer do *end-effector* no espaço [4]. Todavia, este último apresenta uma dificuldade maior para encontrar uma solução dado a inexistência de

uma resposta singular (cada robô apresenta um cálculo diferente para este problema) e a infinidade ou ausência de soluções para determinadas configurações de posições e orientações.

O planejamento de trajetória atua no cálculo para encontrar o melhor caminho no espaço para um manipulador sair do ponto inicial para o destino, sendo responsável por especificar os pontos que o manipulador deve passar, o caminho propriamente dito, para alcançar tal objetivo. Este processo considera o ambiente em que o manipulador está inserido, sua geometria, capacidades motoras, métricas para encontrar o caminho, viabilidade de soluções para a cinemática direta e inversa e restrições definidas pelo pesquisador. Trata-se de um dos problemas mais complexos na área da ciência computacional [4], onde os algoritmos capazes de solucionar esse problema são chamados de planejadores.

## 1.2 Solução computacional para controle

O *Movel!* é um *framework* de código aberto para controle de manipuladores, reunindo um conjunto de técnicas para solucionar as problemáticas apresentadas anteriormente. Como exemplo, para o cálculo da cinemática inversa e direta o *Movel!* apresenta as bibliotecas *KDL (Kinematics and Dynamics Library)*, *TRAC-IK* e *IKFast (Inverse Kinematics Fast)*. Para o planejamento de trajetórias existem as bibliotecas *OMPL (Open Motion Planning Library)*, *CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning)*, *SBPL (Search-Based Planning Library)* e *STOMP (Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning)* [5].

Inicialmente lançado em 2011, o *Movel!* trata-se de um projeto desenvolvido internacionalmente pela comunidade de robótica com o apoio de algumas corporações como a Franka Emika e PickNik Robotics [6]. Implementações utilizando esse *framework* já estão inclusive disponíveis para diversos manipuladores de renomadas empresas do setor industrial como a ABB, Fanuc e Kuka Robotics [6].

Sua implementação baseia-se no *ROS (Robot Operating System)* [7], um sistema flexível de código aberto desenvolvido e mantido pela comunidade internacional e por universidades para o desenvolvimento de *softwares* de controle e comunicação para robôs. Dada a presença de uma comunidade ativa e colaborativa além da facilidade promovida por este sistema, a criação de aplicações na área de manipuladores se tornam ainda mais simples.

## 1.3 Modelo do manipulador

O modelo utilizado para demonstrar o controle de um manipulador é o *Manipulator-H* criado pela ROBOTIS, empresa de tecnologia especializada na produção de atuadores, servomotores e manipuladores [8]. A solução desenvolvida, o pacote *ROS*, para este modelo em específico não está disponível na comunidade *open source*, sendo assim uma contribuição inédita. O *Manipulator-H* disposto na figura 1 apresenta seis graus de liberdade, sendo todas as juntas do tipo rotativa.



Figura 1. Representação do manipulador-H

Fonte: ROBOTIS (2019)

## 2 | METODOLOGIA

Foi desenvolvido inicialmente um pacote de controle para o *Manipulator-H* através do *Movel!*. O pacote apresenta um ambiente de teste e diversas formas de manipulação do robô sendo elas a movimentação através do acionamento posicional das juntas, ir para posições pré-determinadas e ir para pontos escolhidos no espaço tridimensional.

Além disso, foi elaborado um *benchmarking*, uma das funcionalidades implementadas no *Movel!*, para avaliar um conjunto de planejadores da biblioteca *OMPL* [9] utilizando o *KDL* como solução para o cálculo das cinemáticas, ambas bibliotecas padrão. Para o escopo deste artigo, define-se *benchmarking* como uma comparação de desempenho entre os algoritmos capazes de solucionar o planejamento de trajetória para movimentar o *Manipulator-H*.

Para melhor compreensão desse processo de comparação é necessário definir *start state* e *query*. O *start state* é a posição que o manipulador irá iniciar na simulação do *benchmarking* e *query* é um caminho determinado por dois pontos quaisquer do espaço de trabalho.

Foram utilizadas diversas ferramentas na concepção do pacote *ROS* que deu origem a este trabalho: utilizou-se a linguagem *Python* no desenvolvimento do pacote, o *Gazebo* (*software* de simulação) para simular o ambiente de teste e o *RViz* (ferramenta de visualização nativa do *ROS*) para definir graficamente as posições pré-determinadas para o manipulador e os pontos utilizados para compor um *query* e o *start state* do *benchmarking*.

O método de *benchmarking* proposto consiste em avaliar o desempenho dos

planejadores através de um *query* definido por dois pontos aleatórios e válidos para a movimentação do manipulador. Ao total, foi testado um conjunto de nove planejadores cada um com vinte e cinco tentativas para realizar o planejamento com prazo limite de dez segundos para encontrar a solução. O cenário para aplicação da avaliação consiste em um ambiente de teste sem qualquer obstrução de caminho.

As métricas avaliadas para definir o melhor planejador foram duas: o tempo total para o planejador encontrar uma solução e o *solved*, razão entre quantas vezes o planejador conseguiu encontrar uma solução para o caminho e o total máximo de tentativas [10]. O tempo total é descrito pelo somatório do tempo de planejamento, interpolação, simplificação de caminho e processo [10]. Para alcançar o melhor resultado, o planejador precisa minimizar o tempo total e alcançar o valor de máximo de um para o *solved*.

Para apresentação dos resultados utilizou-se o Planner Arena [11], aplicação *web* desenvolvida também pela comunidade responsável pela criação da ferramenta de *benchmarking* do *Movelt!*.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pacote *open source* que deu origem a este artigo se encontra em um repositório público do Senai CIMATEC [12]. Seu material consiste em um pacote completo, com códigos e instruções de instalação bem documentados além de um tutorial para a execução do processo de *benchmarking*. O pacote foi escrito utilizando a linguagem *Python*, de mais alto nível, que é mais acessível sem perder a robustez, mas não está muito presente na comunidade do *Movelt!*.

O desenvolvimento do pacote *ROS* teve como base o uso da ferramenta auxiliar *Setup Assistant*, nativa do *Movelt!*, que utilizou o *URDF (Unified Robot Description Format)* do *Manipulator-H*, formato de arquivo que apresenta a descrição física do robô para gerar o *SDRF (Semantic Robot Description Format)*, arquivo que apresenta a descrição semântica do robô para o *Movelt!*. Durante a aplicação dessa ferramenta, define-se a matriz de colisões do robô, posições pré-configuradas de interesse e se define os solucionadores para os problemas de cinemática e planejamento de trajetórias, sendo escolhidos para esse pacote, respectivamente, *KDL* e *RRT Connect*, presente na biblioteca *OMPL*. Essas escolhas são configuradas como padrões no *Movelt!* sendo a última uma solução muito aceita e recomendada pela comunidade.

Os resultados para o *benchmarking* para a métrica de tempo total são apresentadas nas figuras 3 e 4

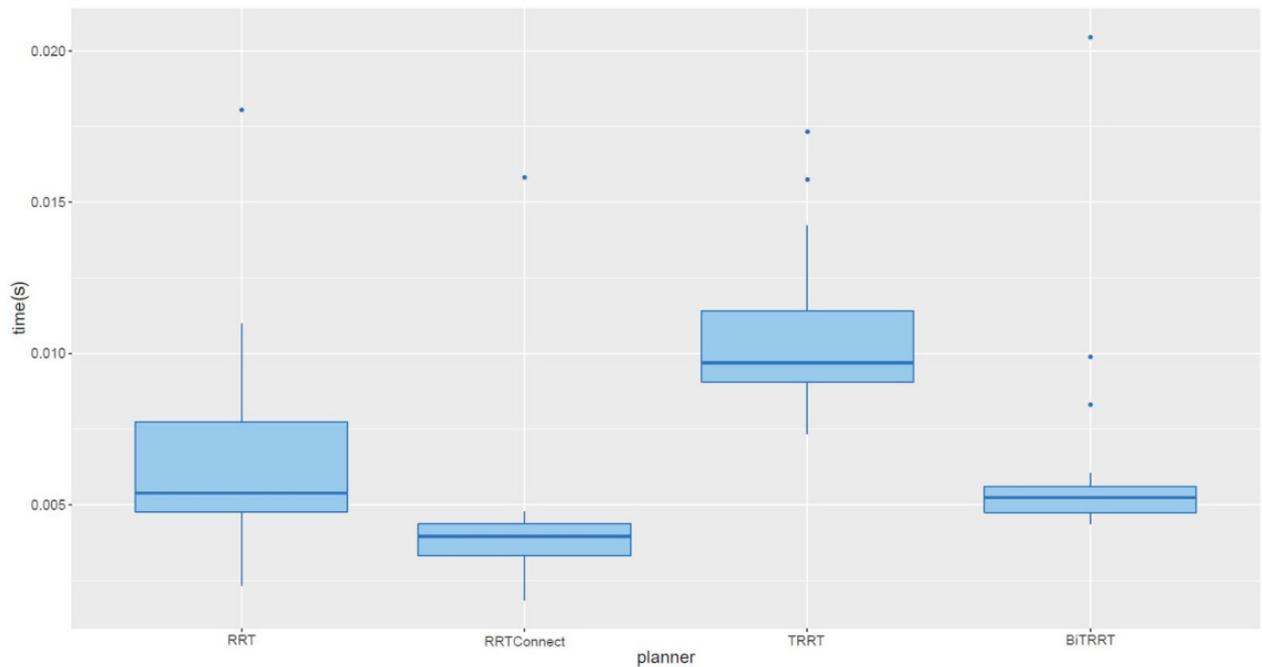


Figura 2. Boxplot do tempo total para o primeiro grupo de planejadores

Fonte: Autoria própria

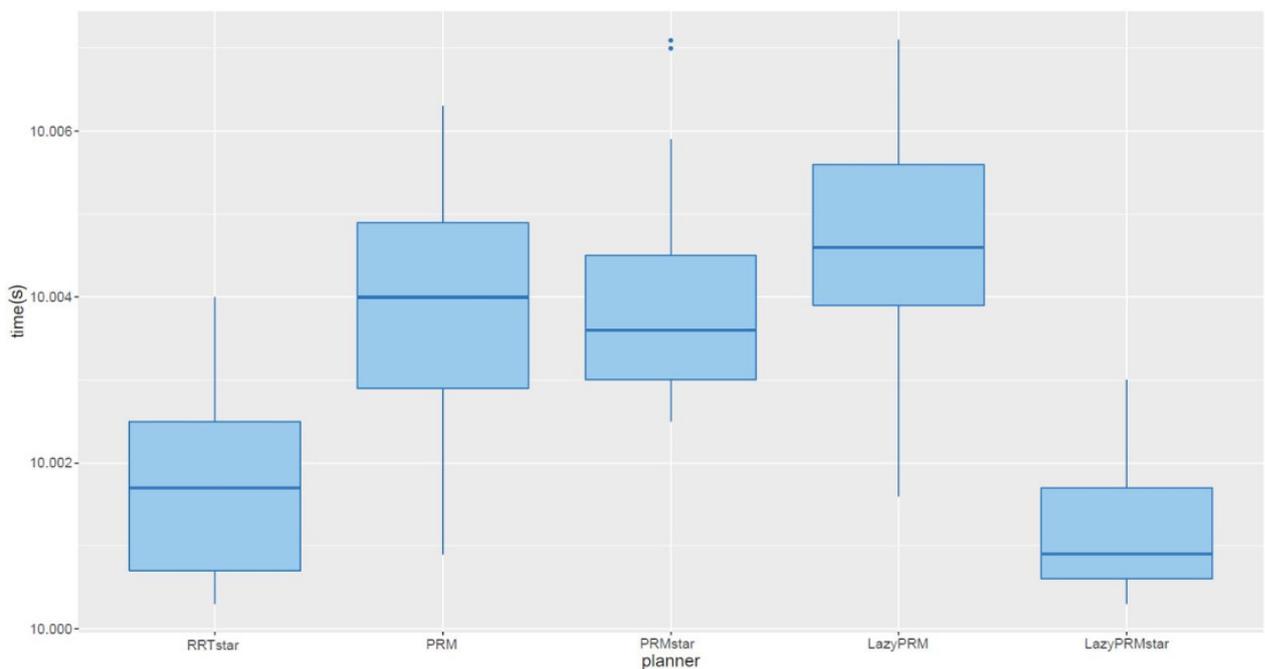


Figura 3. Boxplot do tempo total para o segundo grupo de planejadores

Fonte: Autoria própria

Os gráficos das figuras 2 e 3 são diagramas de caixa referente ao tempo total calculado de cada tentativa para cada planejador. Essa representação é conhecida por *boxplot* e se trata de uma ferramenta gráfica para visualizar a variação do conjunto amostral (representado pelo tamanho da caixa) em torno da média (representado pela linha central e horizontal da caixa).

Os resultados foram divididos em dois grupos, distintos pelo tempo total de solução. Na figura 2 o primeiro grupo é composto por quatro planejadores que apresentam um tempo de resposta inferior a 15 milissegundos, já o segundo grupo de planejadores, representado na figura 3, apresentam um tempo total de resposta em torno de 10 segundos, tempo máximo estabelecido para cada tentativa. Portanto, para aplicações onde o tempo é um fator importante, os planejadores do primeiro grupo demonstram ser uma melhor escolha em comparação aos do segundo para o planejamento de trajetórias para o *Manipulator-H*.

Os resultados para a métrica *solved* todavia, identifica todos os planejadores como capazes de encontrar uma solução para o caminho sem obstrução, visto que conseguiram solucionar o caminho em todas as tentativas, alcançando o valor máximo de um.

Portanto, considerando as métricas definidas, o planejador *RRT Connect* demonstra ser a melhor escolha para o controle do *Manipulator-H*. Apresentado no segundo *boxplot* da esquerda para a direita na figura 2, ele mostra uma menor variação no tempo total em comparação aos outros planejadores do primeiro grupo e a menor média também, sendo abaixo de 5 milissegundos. Isso mostra que seu algoritmo é preciso no encontro das soluções para trajetórias, mesmo sendo testado diversas vezes para o mesmo caminho.

## 4 | CONCLUSÃO

Utilizando o *Manipulator-H* como objeto de estudo e o *MovelIt!* como ferramenta de controle, foi desenvolvida uma solução simples e eficiente para o controle. Além disso foi possível avaliar o planejador mais eficiente considerando as métricas escolhidas através do *benchmarking*: *RRT Connect*. Vale lembrar que apesar deste planejador apresentar melhor resultado, não existe de modo geral uma supremacia para um algoritmo em específico comparado aos outros, mas sim situações em que um pode prevalecer em detrimento de diversas condições a serem especificadas como o tempo máximo para cada tentativa, a presença ou não de obstáculos no ambiente e até mesmo a estrutura do manipulador.

Através desse artigo, é possível verificar que o *MovelIt!* atua como um facilitador para problemas comuns existentes no desenvolvimento de aplicações robóticas que utilizem manipuladores. Dada a sua facilidade de implementação, ferramentas disponíveis e uma comunidade ativa o pesquisador roboticista através do uso desse aparato pode concentrar seus esforços na solução de outros problemas mais complexos e ainda sem solução. Além disso, vale ressaltar a importância da comunidade internacional de robótica no desenvolvimento das principais ferramentas presentes nesse artigo, apresentando soluções de código aberto e, portanto, gratuitas como o *ROS* e o *MovelIt!*.

O pacote desenvolvido utilizando este ferramental, busca propiciar um material para iniciantes e entusiastas nessa área através de um conteúdo explicativo desde a instalação até o uso, algo ausente na comunidade atualmente. Utiliza-se ainda de uma linguagem mais simples, robusta e fácil de compreender como o *Python*. No

futuro, planeja-se incrementar as funcionalidades existentes neste pacote. É almejado acrescentar a possibilidade do uso de uma solução mais robusta para cinemática inversa e direta através do *IKFast* e a visualização do espaço de trabalho do robô.

## REFERÊNCIAS

<sup>1</sup>VINHOLES, Thiago. Lillium apresenta protótipo de táxi aéreo urbano. **Airway**, Disponível em:

<<https://airway.uol.com.br/lillium-apresenta-prototipo-de-taxi-aereo-urbano/>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

<sup>2</sup>HUI, Jonathan. How deep learning fake videos (Deepfake) and how to detect it?.

**Medium**, Disponível em:

<[https://medium.com/@jonathan\\_hui/how-deep-learning-fakes-videos-deepfakes-and-how-to-detect-it-c0b50fbf7cb9](https://medium.com/@jonathan_hui/how-deep-learning-fakes-videos-deepfakes-and-how-to-detect-it-c0b50fbf7cb9)>. Acesso em: 11 ago. 2019.

<sup>3</sup>COLEMAN, David et al. Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study. **ArXiv**, 2014.

<sup>4</sup>SPONG Mark W. et al. **Robot Modeling and Control**. New York: John Wiley & Sons Inc., 2006.

<sup>5</sup>PICKNIK, Consulting. MoveIt! Concepts. **PickNik Robotics**, Disponível em:

<<https://moveit.ros.org/documentation/concepts/>>. Acesso em 12 set. 2019.

<sup>6</sup>SUCAN, Ioan; CHITTA, Sachin. **MoveIt**, 23 mai. 2016. Disponível em:

<<http://moveit.ros.org>>. Acesso em: 04 ago. 2019.

<sup>7</sup>MORGAN Quigley et al. ROS: an open-source Robot Operating System. **ICRA Workshop on Open Source Software**, 2009.

<sup>8</sup>ROBOTIS. About Us. **Robotis**, Disponível em: <<http://www.robotis.us/about-us/>>. Acesso em: 10 set. 2019.

<sup>9</sup>SUCAN, Ioan et al. The Open Motion Planning Library. **IEE Robotics & Automation Magazine**, v.19, n.4, p. 72–82, 2012.

<sup>10</sup>SHADOW ROBOT, Company. Planners Benchmarking Documentation. **Shadow**

**Robot Company**, Disponível em: <<https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/planners-benchmarking/latest/planners-benchmarking.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2019.

<sup>11</sup>MOLL, Mark et al. Benchmarking Motion Planning Algorithms: An Extensible Infrastructure for Analysis and Visualization. **IEE Robotics & Automation Magazine**, v.22, n.3, p. 96–102, 2015.

<sup>12</sup>REIS, Kaike Wesley. MoveIt! Package for Manipulator-H. **Brazilian Institute of**

**Robotics (BIR)**, Disponível em: <[https://github.com/Brazilian-Institute-of-Robotics/manipulator\\_h\\_moveit](https://github.com/Brazilian-Institute-of-Robotics/manipulator_h_moveit)>. Acesso em: 10 ago. 2019.

## DOOGIE MOUSE: UMA PLATAFORMA OPEN SOURCE PARA APLICAÇÃO DE ALGORITMOS INICIAIS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ROBÓTICA MÓVEL

Data de aceite: 02/06/2020  
Data de submissão: 04/02/2020

### Caio Alves Amaral

Centro Universitário SENAI Cimatec  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/7666973722456785>

### Mateus dos Santos Meneses

Centro Universitário SENAI Cimatec  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/5755523863312144>

### Marco Antonio dos Reis

Centro Universitário SENAI Cimatec  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/5861154602467728>

**RESUMO:** Um estudo realizado no Brasil sobre o atual cenário de pesquisas na robótica demonstra que 53,48% dos robôs usados em pesquisas nacionais são construídos no país. Assim, para que pesquisadores eliminem a etapa de projeto de um novo robô em cada nova pesquisa, este trabalho busca realizar a concepção de uma plataforma *open source* do tipo micromouse, utilizando o *framework* ROS e o simulador Gazebo, em que conceitos primários de inteligência artificial podem ser aplicados. Para isso, foi formulado um *benchmarking* e,

por conseguinte, foi elaborada a arquitetura geral e eletrônica e idealizado o modelo mecânico do Doogie Mouse. Os resultados preliminares da simulação expressaram como o tipo de malha do modelo mecânico influenciam na estabilidade e realidade da simulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Open source, ROS, Inteligência Artificial, Robótica Móvel, Micromouse.

DOOGIE MOUSE: AN OPEN SOURCE PLATFORM TO APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INITIAL ALGORITHMS ON MOBILE ROBOTIC

**ABSTRACT:** A survey carried in Brazil about the current research scenario in robotics shows that 53,48% of the robots used in national research are built in the country. Thus, for researchers to eliminate the design stage of a new robot in each new research, this work seeks to realize the design of an open source micromouse platform, using the ROS framework and the Gazebo simulator, whereby primary concepts of artificial intelligence can be applied. For this purpose, was made a benchmarking and, as consequence, the general and electronic architecture were elaborated and the mechanic model of the Doogie Mouse designed. Preliminary simulation results

expressed how the mesh type of the mechanical model influences the stability and reality of the simulation.

**KEYWORDS:** Open source, ROS, Artificial Intelligence, Mobile Robotic, Micromouse.

## 1 | INTRODUÇÃO

As aplicações em IA (Inteligência Artificial) tem crescido nos últimos anos (LI, 2018; PENSTEIN, 2017). Entre tantas aplicações, a IA tem sido bastante utilizada na construção de soluções dentro da robótica móvel, seja a partir de mecanismo de reconhecimento do ambiente em que está inserido o robô (NASCIMENTO, 2018; ALCANTARA, 2018), ou mesmo através do planejamento de trajetórias de movimento.

A competição Micromouse realizada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) faz uso de alguma dessas soluções, na qual um robô diferencial é posto na entrada de um labirinto e deve encontrar uma determinada posição final a partir de seus algoritmos de inteligência no menor tempo possível.

Este trabalho, portanto, propõe a concepção de uma plataforma *open source* do tipo micromouse (KIBLER et al., 2011), permitindo o desenvolvimento de aplicações de conceitos primários de inteligência artificial, sobre forma de algoritmos de busca em plataformas móveis. A integração entre a inteligência artificial e a plataforma móvel será intermediada pelo *Robot Operating System* (ROS), um dos mais utilizados *frameworks* de robótica (TELLEZ; 2019), assim, permitindo o uso de sua vasta biblioteca de pacotes *open source* produzidos por sua comunidade de usuários, reduzindo o tempo gasto “reinventando a roda” ao utilizar-se de ferramentas já disponíveis no *framework* (TELLEZ; 2019). Além disso, o ROS possui integração com o ambiente de simulação Gazebo (KOENIG; HOWARD, 2004), que será utilizado para a concepção do robô (e de seus algoritmos de controle, navegação e percepção) e na realização de testes dentro do ambiente que serão confrontados futuramente com os testes realizados com o protótipo físico.

Assim, propõe-se uma solução para o atual cenário de pesquisas na robótica realizadas no Brasil, no qual 53,48% dos robôs usados em pesquisas nacionais são construídos no país, devido aos altos custos na importação das plataformas de robótica disponíveis no mercado (NETO et al., 2015). A plataforma robótica permitirá aos pesquisadores um maior foco em aplicações e soluções na robótica, ao eliminar a etapa de projeto de um novo robô e de sua interface de comunicação em cada nova pesquisa, contribuindo com o crescimento tecnológico e tornando o desenvolvimento da robótica mais acessível no país.

## 2 | MATERIAS E MÉTODOS

A priori, este robô faz parte de um trabalho multidisciplinar de conclusão de curso de graduação que utiliza a metodologia TheoPrax, envolvendo alunos de Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Mecânica. Assim, os tópicos subsequentes descrevem como a plataforma foi projetada, explorando a arquitetura geral do sistema, seu modelo

mecânico e sua arquitetura eletrônica.

## 2.1 Matriz de Comparação

Ao início do projeto, foi realizado um *benchmarking* visando comparar o que já existia dentro do estado da arte dos micromouse. Através dele, montou-se uma matriz de comparação de forma a quantificar atributos considerados mais significativos para o robô. Levou-se em conta, portanto, a existência da documentação disponível e seu nível de clareza; o uso de algum *framework* de robótica; se faz uso ou suporta algum ambiente de simulação; diversidade de linguagens que a plataforma pode ser programada; como é realizada a interface do usuário; quantidade de diferentes sensores e se a plataforma é expansível, podendo acrescentar a ela outros recursos (seja em *hardware* ou em *software*).

Área	Peso	GreenGiant	Kumamoto National College	Smartmouse	WolfieMouse	Raspberry Pi Mouse V2
Documentação	1	0,5	2	1	2	2,5
Framework de Robótica	1	0	0	0	0	2
Ambiente de Simulação	0,8	0	0	2	1	3
Linguagens de Programação	0,5	1	1	2	2	2
Interface do Usuário	0,5	3	1	1	2	3
Sensores	0,5	2	1	1	3	1
Expansível	0,8	1	0	0	0	1
	<b>Somatório:</b>	<b>4,3</b>	<b>3,5</b>	<b>4,6</b>	<b>6,3</b>	<b>10,5</b>

Tabela 1. Matriz de Comparação

Assim, mapeou-se 5 principais modelos concorrentes, conforme visto na Tabela 1. O

modelo que possui maior nível de detalhamento e mais pontuou em relação a todas as áreas foi o Raspberry Pi Mouse V2. Contudo, toda a documentação desse projeto encontra-se em língua japonesa, sendo inacessível à maior parte do público.

A partir disso, pode-se levantar requisitos para que o projeto do Doogie Mouse contemple seu objetivo. Observou-se que existe uma falta generalizada de documentação acessível dos projetos e pouco uso dos *frameworks* de robótica e de ambientes de simulação. O próprio Raspberry Pi Mouse V2, mesmo sendo capaz de rodar em ambiente de simulação Gazebo a partir do ROS, não possui nenhum modelo de labirinto ou qualquer cenário em que se possa simular o robô, nem possui exemplos de implementação de algoritmos de busca. Portanto, essas funções deverão estar disponíveis no modelo final do Doogie Mouse.

## 2.2 Arquitetura Geral

Inicialmente, foi elaborada uma arquitetura geral, expressa na Figura 1, para demonstrar de forma macro o funcionamento do Doogie Mouse. Embora não explicitado neste diagrama, o robô possui uma unidade central de processamento responsável pelo seu controle. Diante disso, foi especificado para essa função o microcomputador Raspberry PI Zero W.

Conforme Figura 1, o usuário pode interagir com o sistema de controle de três modos: acessando o robô remotamente utilizando o protocolo de rede *Secure Shell* (SSH) sobre uma rede *Ethernet* sem fio; percebendo alertas sonoros emitidos por um *Buzzer*; interagindo fisicamente através de dois botões momentâneos (*push button*). Para a mobilidade, foram escolhidos dois micromotores de corrente contínua com caixa de redução modelo HP-6V que são acionados por um *driver* de potência com dois canais independentes, também conhecido como ponte H. O dispositivo selecionado para o acionamento dos motores foi o TB6612FNG. Já para fornecer informações (posição, orientação e velocidade) para o controle de trajetória da plataforma, foram especificados dois sensores: um par de encoder magnético com sensores de efeito *hall* TLE4946-2K e uma *Inertial Measurement Unit* (IMU) MPU6050. Do mesmo modo, para orientar o sistema de controle nas tomadas de decisões de movimentação, foi adotado sensores ópticos reflexivos compostos por um *Light Emitter Diode* (LED) infravermelho (emissor) e um fototransistor (receptor). Os componentes escolhidos para isso foram o SFH4545 e o TFT4300 respectivamente.

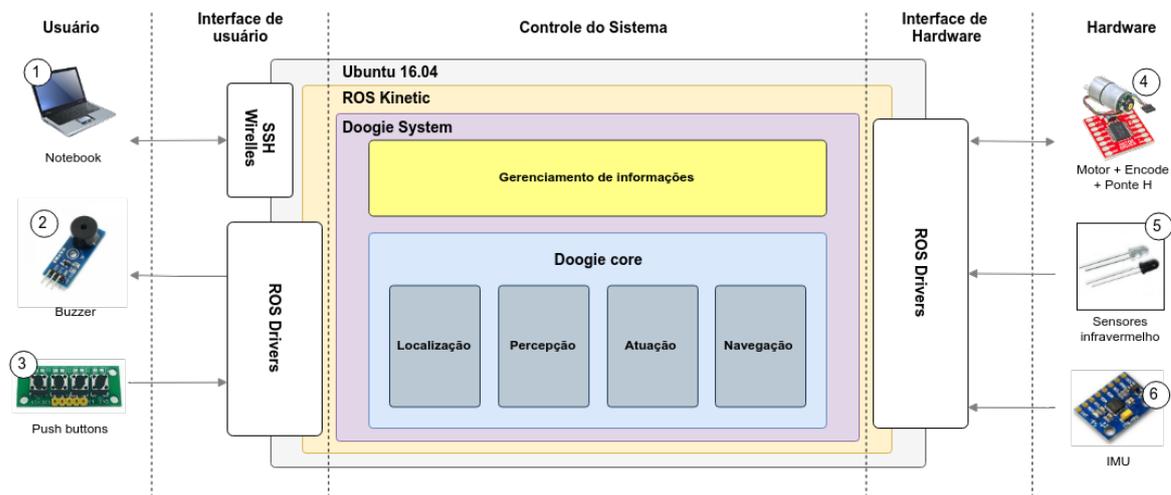


Figura 1: Arquitetura geral do Doogie Mouse

Por fim, para o controle do sistema, foi definida a utilização do *framework* ROS versão Kinetic Kame e o sistema operacional Ubuntu 16.04, ambos instalados na Raspberry Pi. Dessa forma, foram estabelecidos 4 módulos vinculados ao ROS que compõem o núcleo do robô: localização, que dispõe a célula do labirinto onde o robô se encontra; percepção, que fornece informações das paredes existentes em volta da plataforma; atuação, responsável pelo acionamento e controle dos motores; navegação, cujo o objetivo é escolher o caminho ótimo de movimentação, utilizando algoritmos introdutórios de inteligência artificial como busca em largura (KIBLER et al., 2011), busca em profundidade (KOENIG; HOWARD, 2004), *Flood Fill* (RUSSELL, 2013; TJIHARJADI; SETIAWAN, 2016) e *A\** (TJIHARJADI; WIJAYA; SETIAWAN, 2017). Ademais, a modularidade do sistema permite que o desenvolvedor implemente outros algoritmos de inteligência. Por conseguinte, o módulo Gerenciamento de Informações atua como um interlocutor entre o ROS e o usuário. Esses módulos são interfaceados através de ROS *drivers*, realizando conversões de protocolos de comunicação e comandos de controle em dados reconhecidos pelo ambiente ROS.

## 2.3 Modelo Mecânico

Para o design do robô, foi utilizado como um ponto de partida o TON-BOT V1.1, plataforma desenvolvida pela Ioton Technology (IOTON, 2019). Além disso, uma vez que o robô a ser desenvolvido é do tipo micromouse, ele deve ter suas dimensões não superiores a uma seção retangular de 25 x 25 cm (KIBLER et al., 2011).

A partir dessas premissas e da análise feita na subseção 3.1, buscou-se um design mecânico simples e de maior leveza. Dessa forma, será utilizado como *frame* do robô as próprias PCB, buscando posicionar suas rodas de forma a mantê-las alinhadas ao centro de massa de todo o conjunto mecânico. Para tanto, uma modelagem em CAD inicialmente foi realizada através de ferramenta Solidworks, buscando iterativamente a melhor disposição de seus elementos físicos (rodas, sensores e demais componentes eletrônicos das placas). O modelo mecânico final pode ser visualizado na Figura 2.

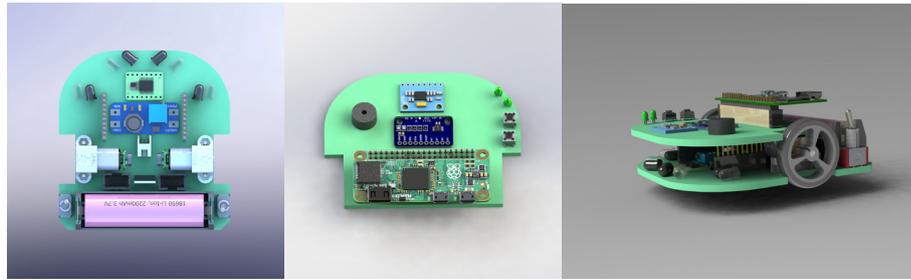


Figura 2. Arquitetura geral do Doogie Mouse

Da esquerda para direita visualiza-se as placas inferior, superior além do modelo do robô visto em perspectiva. A placa inferior possui 98 mm de comprimento e 92,90 mm de largura, enquanto a placa superior possui 75 mm de comprimento e 92,90 mm de largura. Foi necessário o uso de duas placas para melhor adequação dos componentes eletrônicos sem atrapalhar eventuais manutenções no dispositivo nem dificultar sua montagem.

## 2.4 Eletrônica

Com intuito de facilitar a replicação do robô por usuários que queiram utilizá-lo, optou-se pelo uso de *breakout boards*, que são placas eletrônicas pré-montadas. O Doogie possui seis *breakout boards*: dois conversores de tensão DC-DC, modelos MT3608 e U1V10F5, um conversor Analógico/Digital (A/D) ADS1115, uma IMU, um multiplexador analógico 74HC4051 e uma ponte H. Os demais componentes como resistores, transistores, LEDs infravermelho, fototransistores e conectores, são soldados diretamente na Placa de Circuito Impresso (PCI). Esses componentes foram distribuídos nas PCIs superior e inferior do robô, conforme Figura 2. A fim de fornecer energia elétrica para esses componentes, foi especificado uma bateria do tipo Li-Ion modelo 18650 com tensão nominal igual à 3,6 V. A arquitetura elétrica na Figura 3 demonstra como esses componentes descritos estão interligados eletricamente. A propósito de melhor visualização, o referencial de tensão (*Ground - GND*) foi omitido.

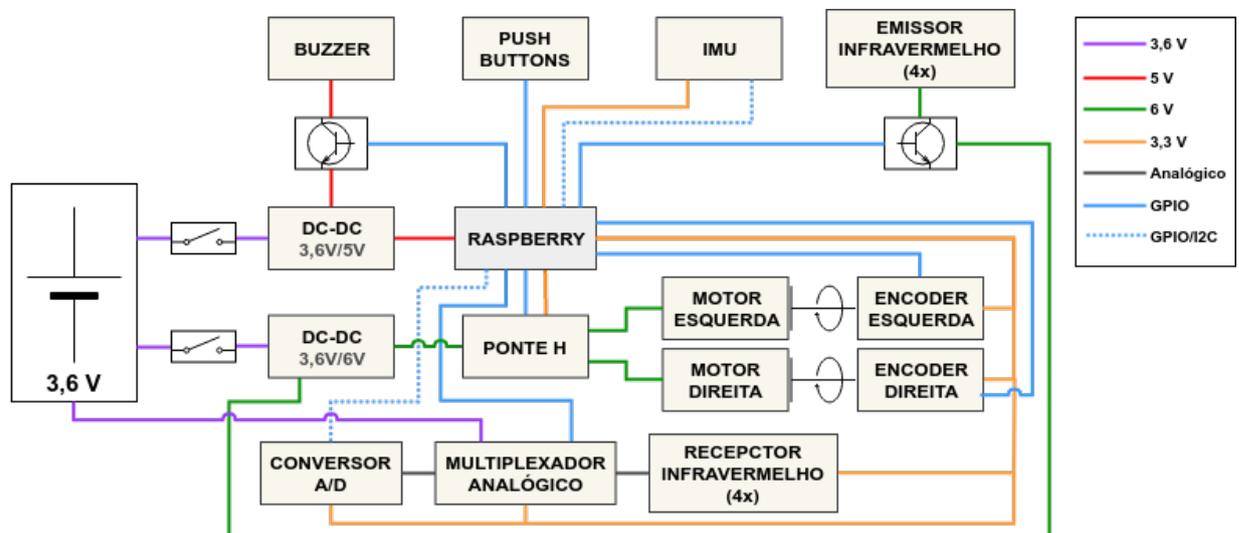


Figura 3. Representação elétrica do Doogie Mouse

### 3 | RESULTADOS PRELIMINARES

A simulação foi realizada no Gazebo 7.0.0, a partir do ROS através de suas bibliotecas do `ros_control` em um Inspiron 15 7548. Para o melhor uso do ambiente, tanto o FPS quanto o *Real Time Factor* foram levados em conta, para uma visualização pelo desenvolvedor mais estável e realista, respectivamente. Diante disso, foi necessário realizar simplificações na malha do robô para maior fluidez da simulação, suprimindo alguns dos elementos presentes no modelo mecânico. A fim de atingir o maior valor de FPS e um *Real Time Factor* mais próximo de um, utilizou-se de testes iterativos, avaliando como o número de faces das malhas afetam a simulação. Uma vez que o Gazebo possui tanto malhas para efeito visual quanto malhas de “*collision box*” (o envoltório do robô capaz de simular contato físico com outros objetos dentro da simulação), os dois foram incluídos no teste. Além disso, comparou-se a simulação com o uso de malhas carregadas a partir de arquivos COLLADA com as carregadas a partir de STL.

	Visual (Faces)	Colisão (Faces)	FPS	Real Time Factor
Doogie_lite_dae	70.410	70.410	~1,5	0,35
Doogie_real_dae	1.091.337	1.091.337	~0,6	0,03
Doogie_lite_stl	70.398	70.398	~4.2	0,33

Tabela 2. Comparativo entre malhas carregadas no Gazebo

	Visual (Faces)	Colisão (Faces)	FPS	Real Time Factor
Doogie_lite_dae	70.410	6	~8,0	0,52
Doogie_real_dae	1.091.337	6	~3,5	0,52

Tabela 3. Comparativo com simplificação da malha de colisão

Os testes foram realizados em um Dell Inspiron 15 7548, com o Ubuntu Xenial (16.04 LTS) e ROS Kinetic. Através deles, conforme a Tabela 2, é evidente como é essencial a simplificação da malha de colisão. Sem nenhum tipo de otimização, a taxa de quadros do Gazebo chega a 0,6 FPS, com a versão mais completa do robô (idêntico ao modelo mecânico gerado no SolidWorks), enquanto que quando a *collision box* é simplificada como um prisma de 6 faces, sua taxa de quadros aumenta em quase 6 vezes, atingindo uma média de 3,5 FPS.

Quanto a diferença entre as malhas em STL e COLLADA, nota-se uma melhora no número de quadros por segundo com o uso do formato STL: 4,2 FPS contra 1,5 FPS. Por outro lado, o Real Time Factor entre COLLADA e STL não diferiram significativamente: 0,35 e 0,33 respectivamente. Os resultados possivelmente são decorrentes da existência de menos arestas na malha, exigindo menor poder computacional para a simulação.

## 4 | CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um robô *open source*, explicando como uma plataforma baseada na competição Micromouse foi projetada utilizando novas concepções de construção como o uso do *framework* ROS, da Raspberry PI Zero W e da ferramenta de simulação Gazebo. Os resultados preliminares apontam uma melhor otimização da simulação ao se reduzir o número de faces presentes nas malhas renderizadas na simulação, atingindo na melhor configuração, 8,0 FPS com o Real Time Factor de 0,52. Posteriormente, um labirinto também será gerado no Gazebo, utilizando uma configuração de malha semelhante a obtida nos resultados, e a partir disso serão simulados os algoritmos de busca dentro da simulação. Além disso, como próximo passo para a concepção do Doogie Mouse, será realizada a montagem do protótipo e, conseqüentemente, os testes

em um labirinto físico. Assim, poderão ser confrontados os resultados em simulação e em ambiente real, verificando a acurácia da simulação. Ademais, por se tratar de um projeto *open source*, todos os documentos de hardware e software bem como um guia do usuário, estarão disponíveis para que o projeto possa ser replicado por estudantes e pesquisadores que queiram utilizar a plataforma.

## REFERÊNCIAS

ALCANTARA, Pedro. **Classificação de Obstáculos Baseada no Classificador k-Nearest Neighbors Aplicada a um Robô de Inspeção de Linha de Transmissão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2018. Disponível em: <http://www.pggee.eng.ufba.br/teses/cb28211baf41ec8222af61ab8a6d05a9.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2019.

IOTON Technologie. Disponível em: <https://github.com/iotontech>. Acesso em 17 ago. 2019.

KIBLER, S. G. *et al.* IEEE Micromouse for mechHistoryatronics research and education. **2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 - Proceedings**, p. 887–892, 2011.

KOENIG, N.; HOWARD, A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. **2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, Los Angeles, v. 3, p. 2149-2154, 28 set. 2004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1389727>. Acesso em: 17 ago. 2019.

LI, Yangyuan. **Stable Modeling on Resource Usage Parameters of MapReduce Application**. Brain, Budapeste, v. 9, n. 2, p. 45-62, 1 maio 2018. DOI 10.5281/zenodo.1245887. Disponível em: <https://zenodo.org/record/1245887#.XVsH-3VKi00>. Acesso em: 17 ago. 2019.

**NASCIMENTO, Matheus. Detecção e classificação de obstáculos para robô de inspeção de linhas de transmissão**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Faculdade Área 1, Salvador, 2018.

NETO, R. P. *et al.* Robótica na educação: Uma revisão sistemática dos Últimos 10 anos. **Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**, n. XXVI, p. 8, 2015.

PENSTEIN, C. R. **A social spin on language analysis**. Nature, Pittsburgh, n. 545, p. 166-167, 10 maio 2017. Disponível em: <https://www-nature.ez148.periodicos.capes.gov.br/articles/545166a#notes>. Acesso em: 17 ago. 2019.

RUSSELL, Stuart. **Inteligência artificial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. xxi, 988 p. ISBN 9788535237016.

**TELLEZ, Ricardo. A History of ROS (Robot Operating System)**. [S. l.], 9 jul. 2019. Disponível em: <http://www.theconstructsim.com/history-ros/>. Acesso em: 11 ago. 2019.

TJIHARJADI, S.; SETIAWAN, E. Design and implementation of a path finding robot using flood fill algorithm. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 5, n. 3, p. 180–185, 2016.

TJIHARJADI, S.; WIJAYA, M. C.; SETIAWAN, E. Optimization maze robot using A\* and flood fill algorithm. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 6, n. 5, p. 366–372, 2017.

## SEISMIC IMAGING USING FPGA APPLIED FOR REVERSE TIME MIGRATION

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 05/02/2020

### **Joaquim Ranyere Santana de Oliveira**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/8072549971315902>

### **João Carlos Nunes Bittencourt**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Cruz das Almas – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/6741995694783822>

### **Deusdete Miranda Matos Junior**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/5317308859913857>

### **Anderson Amorim do Nascimento**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/8000911911840455>

### **Laue Rami Souza Costa de Jesus**

SENAI/CIMATEC

Salvador/BA

<http://lattes.cnpq.br/3794131382143818>

### **Georgina Gonzalez Rojas**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/6526414323159768>

### **Rodrigo Carvalho Tutu**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/1203041686952391>

### **Wagner Luiz Alves de Oliveira**

Universidade Federal da Bahia

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/7355315368234452>

### **Silvano Moreira Junior**

SENAI/CIMATEC

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/3082139503007423>

**ABSTRACT:** Reverse time migration (RTM) modeling is a computationally intensive component in the seismic processing workflow of oil and gas exploration. The RTM algorithm demands the manipulation of a large amount of data. Therefore, the computational kernels of the RTM algorithms need to access a large range of memory positions, leading to a large amount of cache misses, degrading the overall system performance. This work presents a FPGA accelerated platform targeting the computation of the RTM algorithm on a HPC environment. Experimental results highlight that speedups of 112x can be achieved, when compared to a sequential execution

on CPU. When compared to a GPU, the power consumption has been reduced up to 55%.

**KEYWORDS:** Supercomputing, RTM, FPGA, Green computing, Seismic Migration.

**RESUMO:** A modelagem de Migração Reversa no Tempo (RTM) é um componente de alto custo computacional dentro do fluxo de trabalho de processamento sísmico, na exploração de petróleo e gás. Os algoritmos RTM exigem a manipulação de uma grande quantidade de dados, levando a degradação do desempenho devido aos acessos a endereços não aninhados. O presente trabalho apresenta uma plataforma de aceleração em FPGA para o cálculo do algoritmo RTM em um ambiente HPC. Resultados experimentais destacam que acelerações de 112x podem ser alcançadas, quando comparadas à execução sequencial do algoritmo em CPU. Quando levado em consideração o consumo de energia, a plataforma proposta apresentou uma redução de 55% em relação à GPU.

**PALAVRAS-CHAVE:** Supercomputação, RTM, FPGA, Computação verde, Migração Sísmica.

## IMAGEMAMENTO SÍSMICO COM FPGA APLICADO A MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

### 1 | INTRODUCTION

Reconfigurable systems are becoming a key component in high-performance computing systems. The reconfiguration capability increases the computing flexibility, allowing for different solutions to be deployed and tested on-the-fly. This ability is useful for systems that require a combination of high processing power with remote reconfiguration at circuit level. Reconfigurable systems use highly flexible computing fabric, usually Field-Programmable Gate Arrays (FPGA). Nowadays, FPGA devices are adopted in a wide spectrum of applications, ranging from consumer electronics to critical systems such as vehicle automation or mobile network base station transceivers (ATITALLAH *et al.*, 2017; SEXTON *et al.*, 2017). FPGAs are currently also being embedded into HPC cluster nodes starting a new revolution in high performance and cloud computing. Toward this, recent works highlight not only how fast they are, but also its reduced cost and better energy efficiency when compared to CPU and GPU counterparts (KOBAYASHI *et al.*, 2012).

Seismic imaging algorithms for oil exploration, such as RTM (Reverse Time Migration), are a time consuming and memory bound class of application that usually demand large amounts of computational power. Although current computing capabilities meet the requirements for RTM algorithm on production environments, the cost of processing such large amount of data is high and must be taken into account. Efforts targeting the reduction of these costs by using different acceleration strategies are needed. Since the RTM algorithm uses Finite Differences (FD) method, any advancement in accelerating FD kernels may reduce design time of third-party solutions.

The present work introduces a high performance hardware/software co-design that provides a scalable model for seismic imaging. The main goal is to provide an analysis of such an implementation performance and power efficiency against other accelerators. For that it has been used a custom method for 2-D RTM, namely Hybrid Boundary Condition

(HBC), which optimizes memory bandwidth and allows to explore a pipelined architecture (LIU *et al.*, 2013). This design provides a high performance and powerful efficient alternative for accelerating seismic imaging processes through a combination of state of the art RTM techniques and hardware-oriented optimizations.

## 2 | REVERSE TIME MIGRATION

Reverse Time Migration (RTM) is a seismic imaging technique to map the subsurface reflectivity using recorded seismic waveforms. The practice in exploration seismology has established a two-fold approach of seismic imaging: using velocity modeling building to establish the long-wavelength reference velocity models, and using seismic migration to map the short-wavelength reflectivity structures (ZHOU *et al.*, 2018). Especially in complex geological settings, RTM produces better images than other methods. In addition, RTM is the only method that is capable to use all seismic wave types that can be computed numerically (ZHOU *et al.*, 2018).

The migration step can be done before or after stacking and in time or in depth. Basically, in every migration there are two common steps: (1) wavefield extrapolation; and (2) application of an image condition. The extrapolation of the wavefield is a mathematical technique which allows to delay or advance the wavefield. Extrapolations in time are called reverse time extrapolation when the prediction is made for an earlier time; otherwise, when the prediction is made at a later time, the extrapolation is called forward time propagation. Such extrapolations are performed from the solution of the wave equation, which can be seen as a way to make explicit the reverse/forward propagation of the field from measurements made in a given position. Although wavefield modeling can also be performed in the frequency domain, its application to large scale problems is prohibitive due to the implied high computational cost. The image condition is the criterion applied to the extrapolated field to obtain a subsurface image by showing the reflecting points of the seismic energy through the correct positioning of the amplitudes in the migrated section, related to the image of the form.

The RTM method is based on the solution of the full wave equation and uses the condition of cross-correlation image (ZHOU *et al.*, 2018). This image condition was proposed by Clarebout (1971) and establishes that reflectors are located at points in the subsurface where the wavefield of the source coincides in time and space with the receiver wavefield. In this case, the wavefield of the source is propagated, the receiver field is reverse-time extrapolated, and the cross-correlation between both is calculated. At the points where the fields coincide, the image condition will be nonzero indicating the presence of a reflector in that position. For a more in-depth study on RTM refer to (ZHOU *et al.*, 2018), which summarizes the key contributions of representative publications about this method.

The most significant effort toward hardware acceleration of RTM algorithm optimization is reducing the storage requirements. The RTM models proposed in (LIU *et al.*, 2013; ZHOU *et al.*, 2018) indicate the realization of both reverse propagation using the final snapshot and random boundary as the most suited method in order to reduce such storage requirements.

The random boundary fundamentals are based on one copy of the source and receiver wavefields. Since only one copy of such wavefields need to be stored into a memory system, such a technique becomes suitable for encapsulating the entire RTM computation into a single FPGA accelerator instance.

The random boundary technique was presented in Clapp (2009), where the authors replaced the conventional damped region with an increasingly random velocity region. Rather than eliminate the reflections, the method distorts them in order to reduce coherent correlations with the receiver wavefield. Since the wavefield of the boundaries is distorted, it does not coherently correlate with the receiver wavefield. The main disadvantage of random boundary lies in the need for the Free Surface Boundary Condition (FSBC), since the Random Boundary Condition (RBC) induces severe noise along the imaging profile at the surface boundary.

The method presented in Liu (2013) proposes a boundary condition to reconstruct the shot wavefield called Hybrid Boundary Condition (HBC), which adds an absorbing boundary condition to the upper boundary. The HBC scheme aims to solve the free surface boundary problem without increasing memory storage requirements. This methodology requires saving the upper boundary of the source wavefield. The saving boundary technique stores only  $d/2$  layers of data at every surrounding boundary, where  $d$  is the order of the finite-difference scheme. Additionally, by saving layers of the upper side, it is possible to decrease the computational cost. Experimental results also show the effectiveness of the HBC to obtain good images of structures at subsurface, as well as the decrease of random noise present in the final results when compared against the RBC (LIU *et al.*, 2013). Therefore, the HBC with random and saving boundary was defined as our system methodology implementation model.

### 3 | DESIGN ARCHITECTURE

The reference application for the RTM method was designed using C language for both migration and modeling steps. The algorithm was designed from the HBC method, since this strategy better fits the hardware needs without losing image quality. The workload and the data structure management were built to be adapted to other computing architectures, such as FPGA and GPU.

The prototype is composed of a computing node with two Intel Gold 6148 processors and an Intel Arria 10 GX FPGA Development Kit. The hardware component set is composed by the RTM IP-core, an Avalon-MM Interconnection, a DDR4 Memory Interface, and a PCIe controller. The RTM core is the proposed hardware implementation of the HBC RTM functionality.

The Figure 1 presents an overview of the RTM IP-core components designed. The RTM core corresponds to the implementation of the RTM processing element on the target FPGA device. This core is composed of three functional components: (1) a Main Control System; (2) the Scalable Streaming Array (SSA) of Pipelined Stage Modules (PSM); and (3) a Cross-

correlation mechanism.

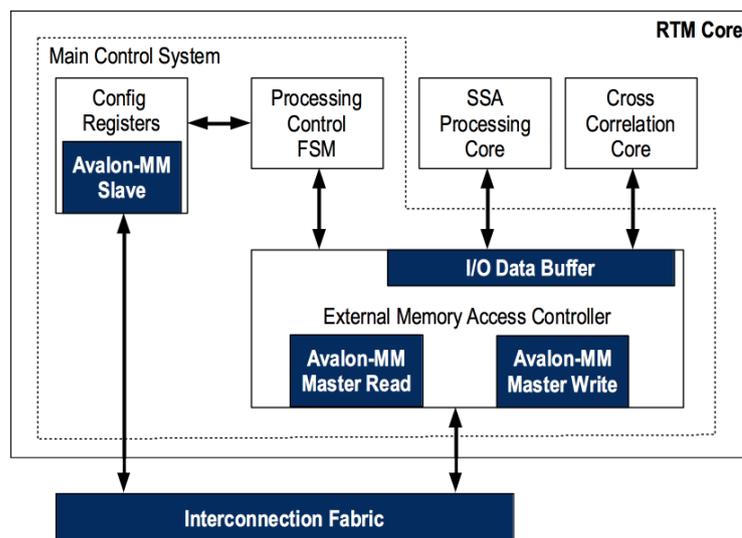


Figure 1. RTM Core main components and interface logical structure.

The Main Control System controls the internal data flow and external memory access through a control interface, a set of configuration registers and the External Memory Access Controller. The Processing Control FSM handles the internal data flow and the external memory access. Such control system mediates the data exchange between the external memory and both the SSA and cross-correlation components. The operation begins when the host software sends the initialization signal, causing specific submodules of the main control system to start their operation by reading the memory data. This data is later stored into several internal I/O data buffers and sent to the PSM units inside the SSA and the cross-correlation. At the same time, when a PSM or cross-correlation module needs to write its data into the device memory, the I/O data buffers provide a mechanism for data to be written and to be sent to memory after that.

The SSA processing core is the main processing unit of the RTM Core, responsible for performing the time steps of the stencil computation. Such a processing is accomplished through several consecutive PSM, which compute the forward and reverse propagation as well as the image reconstruction of the RTM algorithm. The PSM is a multiple stencil operator and multiple time step hardware implementation strategy (SANO; HATSUDA; YAMAMOTO, 2014). When operating in forward propagation mode, the SSA module can process up to  $N$  time steps, where  $N$  is the number of PSM components, starting with the time step  $T = t + 2$ . By processing the time steps from  $t + 2$  to  $t + 2 + N - 1$  in a pipeline approach, the PSM module calculates  $t + 2 + N$ . After the computation of the source wavefield time steps, the data values for  $T = t + 2 + N$  and  $T = t + 2 + N + 1$  are stored into the external memory, in order to calculate the following time steps starting from  $T = t + 2 + N + 2$  until the SSA finishes the computation of all time steps. In the reverse propagation, the PSM are divided into two groups of  $N/2$ . The PSM units ranging from 0 to  $(\frac{N}{2} - 1)$  are responsible for calculating the reverse propagation and the PSM units ranging from  $\frac{N}{2}$  to  $N - 1$  are responsible for the reconstruction of the propagated signal. The results of such calculations are forwarded to the correlation

module for the image condition evaluation process. The advantage of such a strategy relies on both spatial and temporal scalability working together. Internally, the PSM is composed of several Processing Elements (PEs) responsible for the current RTM computation. Such a structure can be replicated in order to compute more points in parallel at the same iteration as well as streaming out points to next PSM module without needing additional memory access operations.

The cross-correlation core performs the computation needed to assess the resulting image quality, which is carried out by the cross-correlation of the wavefields based in reflectors located on the subsurface. The RTM is based on the computation of a full wave equation and uses the condition of cross-correlation image. Such an image condition establishes that reflectors are located at points in the subsurface where the wavefield of the source coincides in time and space with the receiver wavefield. The correlation in each shot is defined by Equation 5, where  $P_s$  is the source wavefield in forward propagation, and  $P_r$  the receiver wavefield in reverse propagation. The final image is given by the sum of the images of all single shots.

$$I_s(z, x) = \sum_{t=0}^T P_s(z, x, t) P_r(z, x, t) \quad (5)$$

## 4 | RESULTS

In this section, experimental results for the conceived RTM algorithm hardware acceleration platform are presented. The results were obtained using the Intel Quartus Prime Pro Edition (v18.0), while the design itself was described using SystemVerilog-HDL language. The hardware platform is an Intel Arria 10 GX FPGA Development Kit, with a single 4 GB DDR4 external memory. The experiment analysis considered the Pluto velocity model. Speed up and power measurements considered migrations of four seismic shots evenly spaced over the model surface.

For an optimized memory bandwidth, the RTM IP-core uses fixed-point numerical representation. An optimal word size for the hardware was determined by comparing the outputs of a fixed-point RTM software with its 32-bit floating-point equivalent, used as reference. Satisfactory migration images were obtained when SNR values ranged between -10 and -20 dB and with IQI above 70%. Thus, 24-bit was the smallest length that met the quality requirements. The total power measure was generated using the Watts Up Pro Portable Power Meter during the runtime of both GPU and FPGA accelerators. The measured data were obtained by multiplying the measured mean power with the total runtime in seconds.

The Table 2 presents the design performance estimated through synthesis results and system runtime on both FPGA and CUDA GPGPU kernel. The values for the Arria 10 were obtained after place & route processing and static timing analysis with parameters for timing optimization, namely Performance (high effort).

When compared to the serial implementation, a speedup of about 112x can be achieved

by using the proposed FPGA accelerated platform. Regarding the other implementation strategies the GPU is only 9% faster, while the runtime of Multi-thread MPI/OMP is about 26% lower. Although FPGA presents such performance decrease, it runs on around eight times slower frequency.

Configuration	Platform	Runtime (s)	Speedup	Energy (Wh)	Efficiency (Speedup/W)
<i>Sequential CPU</i>	Intel Xeon Gold 6148	21,873	1	N/A	N/A
<i>Multi-thread with 16 nodes and 40 threads</i>	Intel Xeon Gold 6148	145.82	150	N/A	N/A
<i>CUDA</i>	NVIDIA Titan XP	706	123.9	36	3.4
<i>FPGA HDL code (180MHz)</i>	Intel Arria 10 GX	781	112.0	<b>20</b>	<b>5.6</b>

Table 2. RTM Accelerated Platform performance analysis and comparison.

Another FPGA advantage is the energy efficiency. The Titan XP GPU running at 1,417 MHz have presented a total energy of 36 Wh, while the Arria 10 GX FPGA at 180 MHz resulted in 20 Wh. The FPGA implementation is more energy-efficient, by consuming about 55% less power when compared to the GPU. Considering the speedup per Watt as an efficiency metric, an efficiency of 5.6 Speed-up/Wh can be achieved by using our acceleration solution, against 3.4 Speedup/Wh obtained by GPU. Thus, the FPGA implementation leads to a design 60% more efficient.

The prototype tests have aimed at validating functions of the communication and image stacking. Initially, memory transfers were made between the host computer and the FPGA in order to guarantee the correctness of the device driver. The bench tests resulted in the images presented in Figure 2.

Figure 2a represents the final image obtained by the software reference model using a 32-bit floating-point representation. Figure 2b is the resulting image obtained after processing the Pluto velocity model on the FPGA accelerated platform.

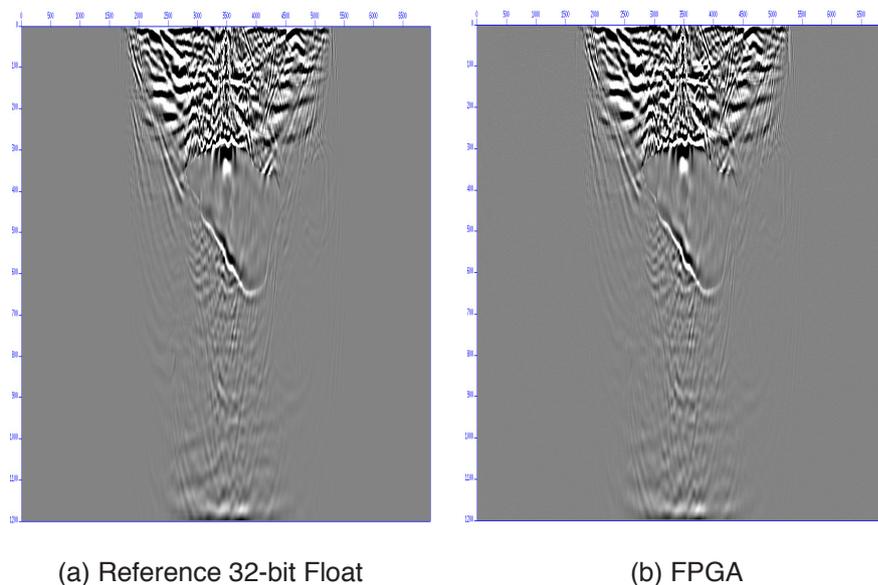


Figure 2. Comparison between reference and accelerated FPGA designs output.

## 5 | CONCLUSION

This paper presented an FPGA accelerated platform targeting the computation of the RTM algorithm on an HPC environment. Hardware implementation aspects were correlated with RTM computation optimizations present in the literature, resulting in the proposed co-design implementation. The main techniques used were the multiple stencil operator and multiple time step hardware implementation strategy as well as the Hybrid Boundary Condition method. The application runs on top of a GNU/Linux operating system, which provides built-in API for memory management and peripheral device access. The FPGA IP-core is a hardware accelerator that receives input data, processes seismic migration, and then sends back the resulting output data. The analysis of performance and power consumption, compared against GPU and CPU, highlights that speedups of 112x can be achieved, when compared to a Sequential CPU implementation. Although the design present lower speedup compared to GPU and CPU multi-threaded, our FPGA accelerator achieved better energy efficiency. The power consumption when compared to a GPU has been reduced up to 55% with an efficiency 60% greater.

## Acknowledgment

The research described in this chapter was funded by the Brazilian Company for Industrial Research and Innovation (EMBRAPPI), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB - 5903/2018) and Shell/BG E&P Brasil LTDA. The work was also supported by the SENAI / CIMATEC Supercomputing Center.

## REFERENCES

ATITALLAH, Rabie Ben; ALI, Karim M. A. **FPGA-Centric High Performance Embedded Computing: Challenges and Trends**. In: 2017 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). [s.l.]: IEEE, 2017,

p. 390–395.

SEXTON, Conor; KAMINSKI, Nicholas J.; MARQUEZ-BARJA, Johann M.; 5G: **Adaptable Networks Enabled by Versatile Radio Access Technologies**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 19, n. 2, p. 688–720, 2017.

KOBAYASHI, R.; TAKAMAEDA-YAMAZAKI, S.; KISE, K. **Towards a Low-Power Accelerator of Many FPGAs for Stencil Computations**. In: 2012 Third International Conference on Networking and Computing. [s.l.]: IEEE, 2012, p. 343–349.

LIU, Hongwei; DING, Renwei; LIU, Lu; **Wavefield reconstruction methods for reverse time migration**. Journal of Geophysics and Engineering, v. 10, n. 1, 2013.

ZHOU, Hua-Wei; HU, Hao; ZOU, Zihui; **Reverse time migration: A prospect of seismic imaging methodology**. Earth-science reviews, v. 179, p. 207–227, 2018.

CLAPP, Robert G. **Reverse time migration with random boundaries**. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009. Huston, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2009, p. 2809–2813.

CLAERBOUT, Jon F. **Toward a unified theory of reflector mapping**. Geophysics, v. 36, n. 3, p. 467–481, 1971.

SANO, K.; HATSUDA, Y.; YAMAMOTO, S. **Multi-FPGA Accelerator for Scalable Stencil Computation with Constant Memory Bandwidth**. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, v. 25, n. 3, p. 695–705, 2014.

## LOCALIZAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS EM AMBIENTE INTERNOS USANDO MARCOS FIDUCIAIS

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 05/02/2020

### Gabriel da Silva Santos

Centro Universitário Senai Cimatec - Robótica  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/4689255973901826>

### Etevaldo Andrade Cardoso Neto

Centro Universitário Senai Cimatec - Robótica  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/4301084474127511>

### Marco Antonio dos Reis

Centro Universitário Senai Cimatec - Robótica  
Salvador – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/5861154602467728>

**RESUMO:** O trabalho teve por objetivo utilizar marcos fiduciais para localizar um robô em ambientes internos utilizando simulação como ferramenta de testes. Foi desenvolvido um ambiente com marcos fiduciais espalhados para o robô identificar e poder recalculá-lo a sua posição comparado com o referencial dos sensores de odometria. Foi possível observar que este método aplicado para ambientes internos tem um baixo custo computacional, causado pela facilidade de leitura dos marcos, e uma alta precisão na localização do robô em

comparação com outros métodos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Localização; Marcos fiduciais; Simulação;

### INDOOR LOCALIZATION FOR MOBILE ROBOTS USING FIDUCIAL MARKERS

**ABSTRACT:** The work aimed to use fiducial markers to locate a robot indoors using a simulation environment as a testing tool. An environment with scattered fiducial markers was developed for the robot to identify and be able to recalculate its position with the odometer sensors reference frame. It was observed that this method applied for indoor environments has a low computational cost, caused for the readability of the landmarks, and a high accuracy in robot localization compared to other methods.

**KEYWORDS:** Localization; Fiducial markers; Simulation;

### 1 | INTRODUÇÃO

Com o advento de técnicas mais aprimoradas, sensores mais precisos e maior poder de processamento os robôs móveis tem tido um aumento de possíveis aplicações nas quais eles podem ser utilizados. Para tal eles precisam realizar

atividades que incluem movimentação e tomada de decisão, mas para isso eles precisam de informações dos seus sensores que permitam a eles uma noção precisa de onde eles estão para poderem iniciar as suas atividades com precisão e por isso a localização é um elemento vital para o desenvolvimento da robótica móvel.

## 1.1 Localização e sensores

Localização é o lugar em que algo se encontra e o ato ou efeito de localizar. Dentro da robótica móvel a localização é uma informação indispensável, pois indica ao robô em que parte do ambiente ele está e a partir disso ele pode tomar as decisões cabíveis a cada situação.

Por se tratar de uma informação primordial para os processos foram desenvolvidas diversas técnicas de localização como Filtro de Bayes, Método de Markov, Filtros Gaussianos, Filtros de Partículas[9]. Para que cada um desses métodos possam ser aplicados é necessário extrair as informações do ambiente através de sensores que podem ser encoders, IMUs (Inertial measurement unit), GPS (Global Positioning System), LIDAR (Light Detection And Ranging) e câmeras[6].

Cada sensor extrai tipos distintos de informações, mas todos com o objetivo de fornecer conhecimento sobre o ambiente em que o robô se encontra. No caso de encoders e IMUs a informação que o robô recebe é referente a sua variação dentro do ambiente, onde a IMU entrega os valores de aceleração angular [1] e o encoder o quanto o robô movimentou-se em relação ao ponto inicial. O LIDAR é um sensor óptico que mede as propriedades da luz refletida a fim de obter a distância ou outras informações de um objeto distante [10]. As câmeras são sensores que extraem as informações necessárias para o reconhecimento da posição através do processamento das imagens, que por sua vez podem ter ou não elementos com a função de demarcar um espaço no ambiente, como os marcos fiduciais artificiais.

## 1.2 Marcos Fiduciais

Marcos fiduciais são objetos no campo de visão de um sistema que são utilizados como pontos de referência ou medida. Eles são utilizados em diversas áreas, como na medicina no tratamento contra o câncer onde eles são utilizados como marcadores na radioterapia para facilitar os alvos do tratamento contra um tumor, já na microeletrônica são utilizados na construção de placas de circuitos impressos e são alocados para localizar as partes da placa.

Na robótica são utilizados os marcos fiduciais artificiais, que são padrões gerados para serem interpretados por um sistema de visão computacional. Esses marcos tem a capacidade de apresentar informações que variam de acordo com o seu padrão e são aplicados quando velocidade e precisão são requeridos pelo sistema, pois são fáceis de serem detectados [5].

Entre os diversos tipos de marcos fiduciais que existem os que são baseados em superfícies quadráticas se tornaram muito atraentes por permitirem a extração da posição da câmera através das quatro quinas, como é possível observar na Figura 1.



Figura 1. Exemplos de marcos fiduciais artificiais.

### 1.3 Posição e Orientação utilizando um Marco Fiducial

A estimativa da posição e orientação de uma câmera calibrada utilizando pontos no mundo e projeções em uma imagem é um problema chamado de Perspective-n-Point. Para este estudo, é utilizada a função `solvepnp` disponível na biblioteca do OpenCV (Biblioteca de Visão Computacional), onde é possível fornecer a posição na imagem em pixels dos contornos dos ArUcos, previamente detectados, e então retornar com os valores de translação e rotação em relação a câmera[2][8][3], como está representado na Figura 2.

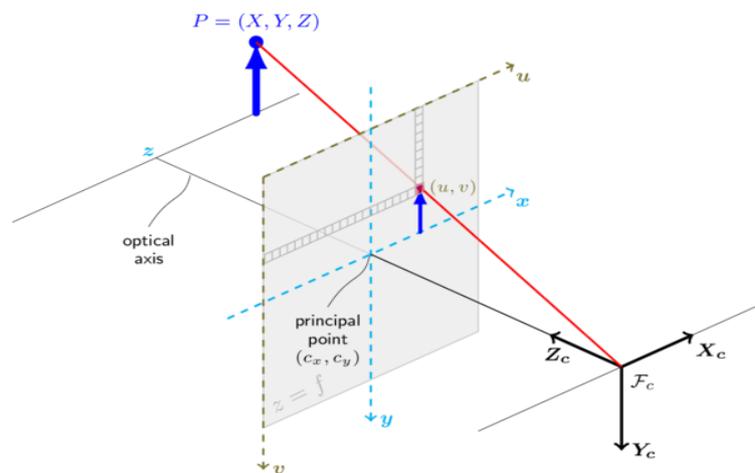


Figura 2. Extração do posicionamento através da câmera.

## 2 | METODOLOGIA

Os experimentos deste trabalho foram feitos em um ambiente de simulação no Gazebo. Ele é um software de código aberto mantido pela OSRF (Open Source Robotics Foundation) que possibilita a simular as interações do robô com um ambiente físico fielmente. Além disso o Gazebo possui integração com o ROS (Robot Operating System), que é o framework utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

A câmera utilizada na simulação foi uma câmera de simulação genérica, com resolução 640x480px, com a matriz de calibração da câmera dada por (1), quanto aos marcos fiduciais, o padrão escolhido foi ArUco[5][10], pois possuem extensas bibliotecas, utilizadores e estudos. Nos experimentos foi utilizada ArUcos do dicionário 6x6 com dimensões de 100mm e 150mm. O ambiente da simulação foi uma área de  $48 \square^2$ .

$$K = \begin{bmatrix} 530.47 & 0.00 & 320.50 \\ 0.00 & 530.47 & 240.50 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (1)$$

O robô utilizado para os testes na simulação foi o TURTLEBOT3 Waffle PI da empresa ROBOTIS com dimensões de comprimento, largura e altura de 281mm x 306mm x 141mm respectivamente, com peso de 1.8kg, representado na Figura 3.



Figura 3. Robô no ambiente do Gazebo.

Para a análise dos dados da posição da base do robô, não foi utilizado nenhum filtro para fusão de medidas com a odometria, permitindo a possibilidade de visualizar os dados diretamente da inferência do algoritmo de cálculo de posicionamento do robô.

Foram realizados experimentos, seguindo o fluxograma na Figura 4, posicionando o robô no mundo da simulação, onde o objetivo foi estimar a posição e comparar com a posição “real” do robô fornecida pelo simulador. Os experimentos se diferenciam pela orientação dos marcadores em relação ao mundo, e com a movimentação ou não do robô durante as tomadas de imagens para o cálculo da posição.

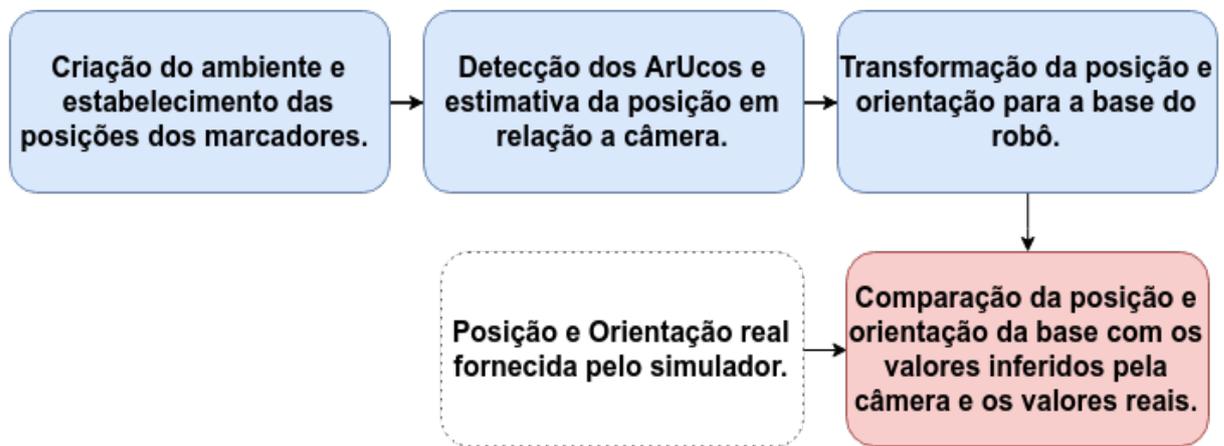


Figura 4. Fluxograma de Simulação e Análise dos dados.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Média de Posição e Quatérnios

Com o objetivo de garantir uma qualidade maior na obtenção das posições dos Marcos Fiduciais em relação ao frame ótico da câmera, foi calculada uma média da pose completa. Para o cálculo da média da pose, foi obtido N amostras para cada medida, e para cada amostra se obtém a matriz de posição e matriz de quatérnios. Para a média da posição foi utilizada a equação (2), onde  $A_t$  é área total do ArUco na imagem (em px),  $A_i$  é a área de cada ArUco.  $p_i$  é a posição de cada marco e  $\bar{p}$  é a posição média.

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_x \\ \bar{p}_y \\ \bar{p}_z \end{bmatrix} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=0}^N A_i \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}_i \quad (2)$$

Foi utilizado o recurso da área, pois tendo uma área maior o marco se torna usualmente mais confiável[2], logo, é interessante inserir esse parâmetro para diminuir o peso de marcos menores ou que estejam mais distantes. Por motivos análogos a média da posição, foi necessário calcular a média dos quatérnios, responsáveis pela orientação do robô, utilizado o método de Markley[4].

$$Q = \frac{1}{A_t} \sum_{i=0}^N A_i q_i q_i^t \quad Qv = \lambda v \quad (3)$$

### 3.2 Transformações

As transformadas homogêneas são transformadas que descrevem a posição e orientação de algo em relação à um dado referencial. O objetivo principal deste estudo foi obter a transformada entre a base do robô e a referência global (W Tbase), representada na

Figura 5.

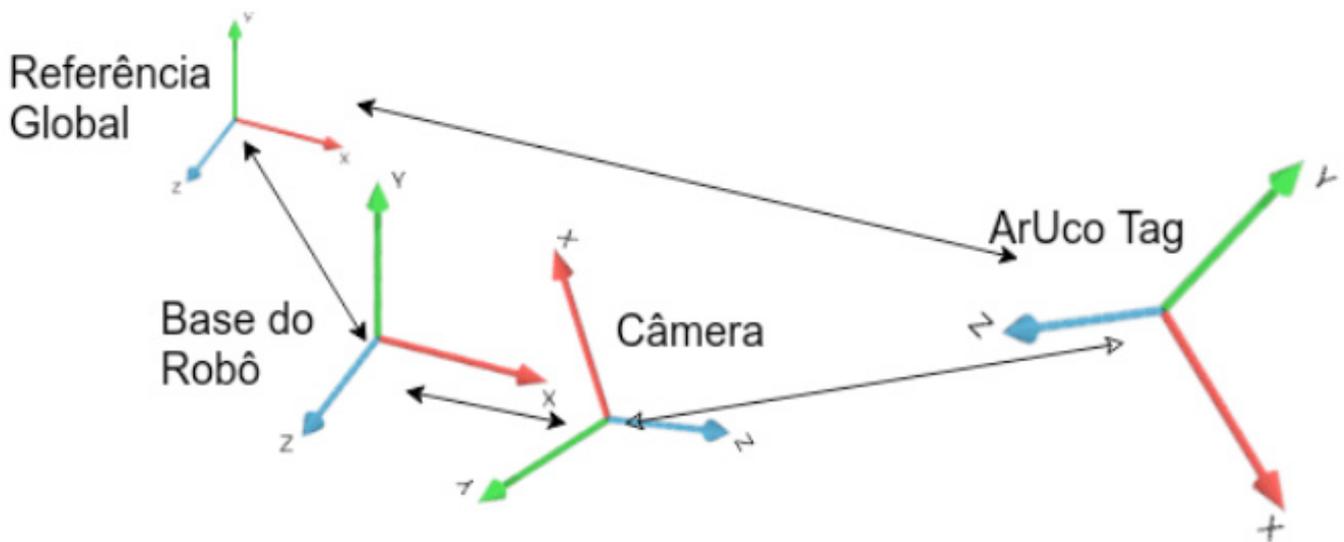


Figura 5. Representação das transformadas

Para conseguir isso, foi utilizada as transformadas predefinidas dos marcos com relação a referência global ( ${}^W T_{tag}$ ) e da câmera para a base do robô ( ${}^{base} T_{cam}$ ). Para obter a transformada desejada, foi utilizada a equação (4), onde o único elemento desconhecido até então é  ${}^{tag} T_{cam}$ , que é obtido utilizando os ArUcos.

$${}^W T_{base} = {}^W T_{tag} \times {}^{tag} T_{cam} \times {}^{base} T_{cam}^{-1} \quad (4)$$

É importante relembrar a equação (4) em sua forma completo é dado pela equação (5), porém  $V$  que representa o ruído das medições foi descartado dos cálculos por motivos de simplificação.

$${}^W T_{base} = {}^W T_{tag} \times {}^{tag} T_{cam} \times {}^{base} T_{cam}^{-1} + V \quad (5)$$

### 3.3 Simulações

Para as simulações, foi desenvolvido duas baterias de experimentos, uma com o robô estático no ambiente, e outro com o robô em movimento. Dessa maneira é possível diferenciar a eficiência da medição quando ocorrem mudanças bruscas na imagem. Foram escolhidos 4 pontos aleatórios no ambiente de simulação onde o robô poderia visualizar no mínimo 2 marcos dispostos no ambiente. Com esses quatro pontos o robô inicializou a câmera e utilizando a média da posição obtida a partir dos marcos ArUcos calculou a transformação  ${}^{tag} T_{cam}$ , e então foi utilizada a equação (4) para encontrar a relação do robô com o referencial global. A Figura 6 exhibe as posições “reais” do robô, com a legenda Real(), e as posições

inferidas, com a legenda Cal(). Os círculos representam a localização do robô no mapa, enquanto os traços representam a orientação.

Já os testes realizados com o robô em movimento tiveram os resultados das posições “reais” e os inferidos comparados separadamente com seus correspondentes. Alguns momentos a posição foi alterada bruscamente para visualização do efeito na inferência da medição, porém apesar de um desvio, o resultado converge para o resultado esperado, apresentado na Figura 7.

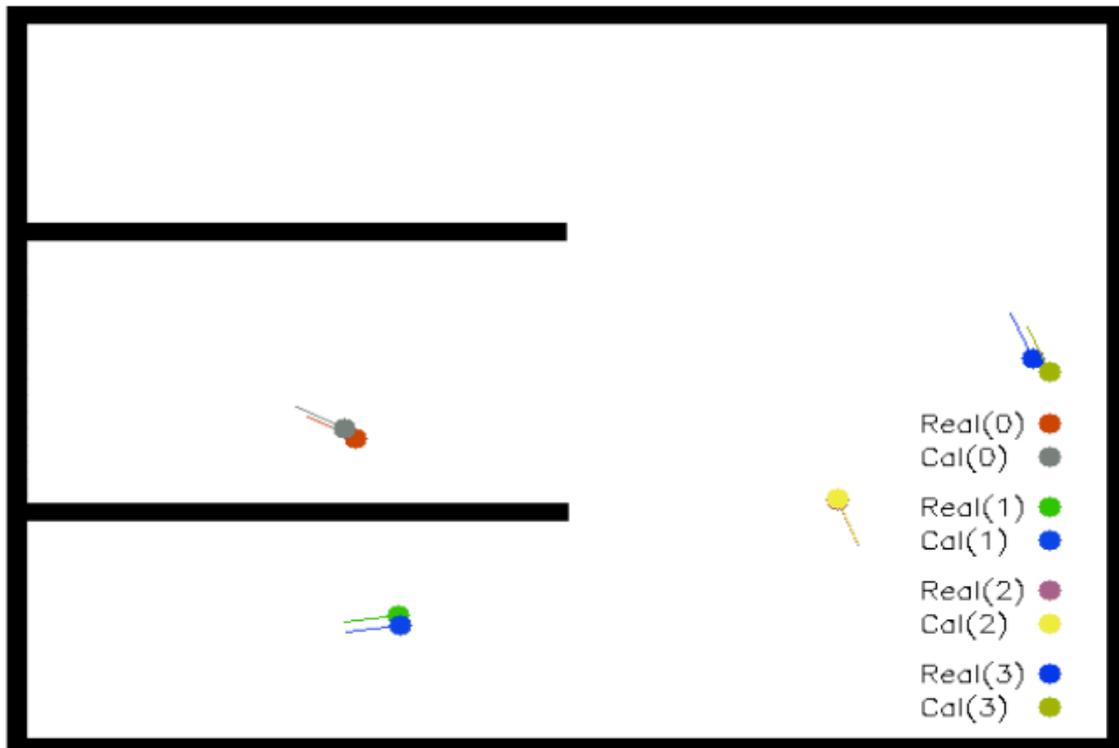


Figura 6. Posições Estáticas.

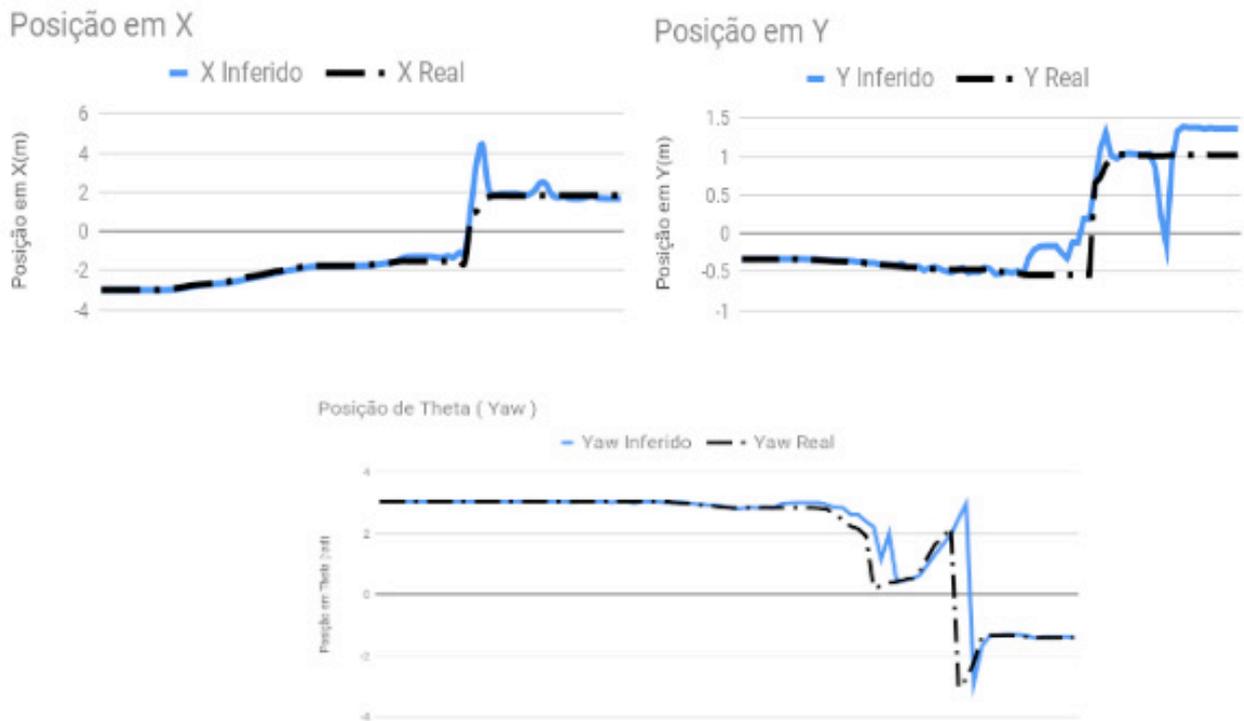


Figura 7. Comparação entre variáveis inferidas e reais.

É possível perceber que em momentos onde a posição é variada lentamente o erro associado a posição inferida se torna baixo, porém quando o marco tem sua posição variada de forma brusca, em relação a câmera, o erro é aumentado.

## 4 | CONCLUSÃO

As figuras 6 e 7 demonstram que é possível realizar a localização com alto grau de confiança, porém em algumas condições podem não possuir um desvio que deve ser considerado. Todavia a inclusão de filtros preditivos e fusão sensorial podem diminuir a imprecisão. O que abre oportunidades para novos estudos visando entender como e quanto pode ser aprimorado a técnica de localização.

Apesar de possuir erros associados a sua medição, os marcos fiduciais se mostram muito úteis por utilizarem um algoritmo de baixo custo computacional e sendo necessário somente uma câmera, com isso, pode ser interessante sua implementação em aplicações às quais esses erros se tornem aceitáveis ou desprezíveis e também para fornecer uma confiança na localização global no processo de navegação utilizando outras técnicas como o SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

## REFERÊNCIAS

[1] AD King. Inertial navigation-forty years of evolution. GEC review, 13(3):140– 149, 1998.

[2] Alberto López-Cerón and José M Canas. Accuracy analysis of marker-based 3D visual localization. In XXXVII Jornadas de Automatica Workshop, 2016.

- [3] Andrej Babinec, Ladislav Jurišica, Peter Hubinsky, and František Ducho. Visual localization of mobile robot using artificial markers. *Procedia Engineering*, 96:1–9, 2014.
- [4] F Landis Markley, Yang Cheng, John Lucas Crassidis, and Yaakov Oshman. Averaging quaternions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(4):1193–1197, 2007.
- [5] Francisco J Romero-Ramirez, Rafael Muñoz-Salinas, and Rafael MedinaCarnicer. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and vision Computing*, 76:38–47, 2018.
- [6] Maja J Mataric, Humberto Ferasoli Filho, José Reinaldo Silva, and Silas Franco dos Reis Alves. *Introdução à robótica*. 2014.
- [7] Marcos Giongo, Henrique Soares Koehler, Sebastião do Amaral Machado, Flavio Felipe Kirchner, and Marco Marchetti. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(63):231, 2010.
- [8] Radu Horaud, Bernard Conio, Olivier Le Boulleux, and Bernard Lacolle. An analytic solution for the perspective 4-point problem. In *Proceedings CVPR'89: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 500–507. IEEE, 1989.
- [9] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
- [10] Sergio Garrido-Jurado, Rafael Muñoz-Salinas, Francisco José Madrid-Cuevas, and Manuel Jesús Marín-Jiménez. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6):2280–2292, 2014.

## AVALIAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE AMIDO COMO ADITIVO A LUBRIFICANTES

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 03/02/2020

### **Matheus Gonçalves Leão de Oliveira**

Universidade Federal do  
Recôncavo da Bahia – UFRB/CETEC  
Cruz das Almas – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/1815044778561081>

### **Pollyana Grazielle Luz da Rocha**

Universidade Federal do  
Recôncavo da Bahia – UFRB/CETEC  
Cruz das Almas – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/3996127082434031>

### **Paulo Vitor França Lemos**

Universidade Federal da Bahia – RENORBIO-  
UFBA  
Salvador– Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/4388682631324552>

### **Denilson de Jesus Assis**

Universidade Salvador-UNIFACS  
Escola de Arquitetura, Engenharia e  
Tecnologia da Informação  
Salvador-Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/3885608557468126>

### **Adelson Ribeiro de Almeida Júnior**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
– UFRB/CETEC  
Cruz das Almas – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/6522996398201398>

### **Jania Betânia Alves da Silva**

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
– UFRB/CETEC  
Cruz das Almas – Bahia  
<http://lattes.cnpq.br/8274283822651950>

**RESUMO:** Este trabalho traz um estudo sobre produção de nanopartículas de amido de mandioca (SNP), por hidrólise ácida, e sua eficiência como aditivo para lubrificantes. O nanolubrificante foi preparado utilizando o óleo Rocol® Ultracut 250, adicionado de SNP's em concentrações variadas (0,05, 0,5, 1,00 e 1,25% m/m). As nanopartículas foram caracterizadas quanto ao Potencial Zeta e análise termogravimétrica (TGA). O nanolubrificante (Rocol® Ultracut 250 + SNP), foi submetido ao teste pino-disco, onde foram medidos o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e a taxa de desgaste ( $w$ ), antes e depois da adição das SNP's. A adição de nanopartículas de amido ao lubrificante levou a melhorias significativas no desempenho do mesmo, com redução do coeficiente de atrito em torno de 30% e aumento da taxa de desgaste em mais de 700%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanolubrificante; Nanopartículas de amido; Coeficiente de atrito; Taxa de desgaste

**ABSTRACT:** This work brings a study on the production of nanoparticles of cassava starch (SNP), by acid hydrolysis, and its efficiency as an additive for lubricants. The nanolubricant was prepared using Rocol® Ultracut 250 oil, added with SNP's in varying concentrations (0.05, 0.5, 1.00 and 1.25% w / w). The nanoparticles were characterized for the Zeta Potential and thermogravimetric analysis (TGA). The nanolubricant (Rocol® Ultracut 250 + SNP) was subjected to the pin-disc test, where the friction coefficient ( $\mu$ ) and the wear rate (w) were measured, before and after the addition of the SNP's. The addition of starch nanoparticles to the lubricant led to significant improvements in its performance, with a reduction of the friction coefficient by around 30% and an increase in the wear rate by more than 700%.

**KEYWORDS:** Nanolubricant; Starch nanoparticles; Coefficient of friction; Wear rate

### 1 | INTRODUÇÃO

Atrito, desgaste e lubrificação são parâmetros de estudo da humanidade desde tempos antigos, porém a tribologia foi oficialmente reconhecida como ciência em 1966 pelo governo inglês, com iniciativa de H. Pete Jost (RADI et. al., 2007). Entender os fenômenos relacionados à interação de superfícies em movimento relativo é à base da tribologia.

Junto à necessidade de compreender e solucionar problemas relacionados às condições tribológica, o avanço da tecnologia e a busca de novos materiais levou a produção de lubrificantes diferenciados, no quesito de aproveitamento energético e vida útil de equipamentos.

Os lubrificantes são materiais utilizados para reduzir os efeitos do atrito e suas consequências (desgaste, aumento de temperatura e etc.). Na usinagem são chamados de fluido de corte, sendo responsável por resfriar e lubrificar a região de contato entre a peça e a ferramenta. (MAIA et. al., 2007; JULIÃO, 2011). No geral, os óleos lubrificantes apresentam aditivos, a fim de obter um fluido adequado às condições de trabalho ao qual o lubrificante é destinado (NETO, 2005). Quando acrescidos de nanopartículas (metais, óxidos, biopolímeros etc.), recebem o nome de nanolubrificantes. O uso de nanopartículas de  $\text{MoS}_2$  como aditivo, por exemplo, potencializam a propriedade lubrificante (redução do coeficiente de atrito) além de aumentar a resistência à corrosão e oxidação (BERNARDI, 2011). Nanotubos de carbono e nanografites, também utilizados como aditivos, aumentam a propriedade lubrificante e também são ótimos condutores térmicos, acarretando propriedades refrigerantes ao fluido (CHEN et. al., 2005; OLIVEIRA et. al., 2016)

O amido é um polissacarídeo formado basicamente por dois polímeros: amilose e amilopectina. A amilose (região amorfa) corresponde cerca de 20% da estrutura molecular do amido; já a amilopectina (região cristalina), o restante. Suas concentrações variam de acordo com a origem do amido. Em relação ao proveniente da mandioca, a porcentagem de amilose pode variar entre 13,6 e 23,8%. As nanopartículas de amido (SNP) podem ser obtidas através de processos físicos e/ou químicos, como o uso de ultrassom e/ou hidrólise ácida. Quanto a hidrólise, a reação do ácido degrada a região amorfa e encurta as ligações

na região cristalina, formando os nanocristais (DENARDIN, 2008; GONÇALVES, 2013)

Provenientes de fontes renováveis e de fácil produção, as nanopartículas de amido (SNP's) apresentam características interessantes para serem aproveitadas como aditivos para lubrificantes, como resistência mecânica e seu potencial biodegradável. Considerando este contexto, este trabalho traz um estudo sobre a produção de nanopartículas de amido de mandioca para utilização como aditivo para lubrificantes.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Síntese de Nanopartículas de amido

A síntese das SNP's foi através de hidrólise ácida seguindo o método proposto por (GONÇALVES, 2013), com adaptações. Pesou-se 9,9g de amido de mandioca e diluiu-se em 225mL de solução de HCl a 2%. A suspensão foi mantida reservada em tubos Falcon à temperatura ambiente durante 49 dias e submetida à agitação diária. Para neutralizar a reação, no 50º dia, foram feitas 9 (nove) lavagens com água destilada, centrifugando (3800rpm/20min) as amostras, até obter pH neutro.

### 2.2 Caracterização das SNP's

#### 2.2.1 Potencial Zeta ( $\zeta$ )

O potencial zeta ( $\zeta$ ) (SOUSA, 2017) é um parâmetro indicador do potencial eletrocinético em um sistema coloidal. A análise foi realizada usando o dispositivo Zetasizer, da série Nano, Malvern Instruments, através de espelhamento de luz. A partir deste, é possível estimar o diâmetro médio das nanopartículas e o  $\zeta$ .

#### 2.2.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é uma técnica termoanalítica que assiste na perda de massa da amostra em função da temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). Para isto, utilizou-se o equipamento Perkin Elmer Pyris 1, com atmosfera inerte ( $N_2$ ) com fluxo de 20 mL/min e taxa de aquecimento de 20 °C/min em uma faixa de temperatura entre 25 e 800°C.

### 2.3 Teste pino-disco

Para adicionar as SNP's ao Rocol® Ultracut 250 foi necessário diluir o lubrificante, na proporção de 35:1 partes de água destilada e óleo. Foram preparados volumes de 2L de nanolubrificantes, cada qual com concentrações de 0,05, 0,5, 1,0 e 1,25% (m/m) de SNP's, em relação à massa do óleo base.

Para o teste, o disco foi acoplado junto a um eixo no torno mecânico e um dispositivo fora montado para acoplar a carga e a esfera. Foram utilizadas arruelas de aço galvanizado com dureza superficial aproximada de 63 HR30T como corpo de prova; e esferas de aço 52100, com dureza aproximada de 800 HV e 5mm de diâmetro. Adotou-se uma carga (8,66N) e duas velocidades de rotação (63 e 500rpm). Primeiramente realizado a seco – sem adição

de lubrificantes; com o Rocol® Ultracut 250 e assim, com o nanolubrificante (aditivado com nanopartículas de amido).

Torna-se fundamental conhecer precisamente a massa da amostra para análise de desgaste, verificando a massa perdida durante o processo, com ou sem lubrificação. Com este dado, é possível quantificar e analisar a taxa de desgaste, através da equação (1)

$$w = \frac{V}{F \cdot x} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \quad (1)$$

Onde  $w$  é a taxa de desgaste,  $V$  é a perda de volume da amostra,  $F$  (N) é a carga aplicada e  $x$  é a distância (m) percorrida pelo pino. O volume é correlacionado com a perda de massa e com a massa específica da amostra (CASTRO et. al., 2015). Cada teste foi realizado em triplicata.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Caracterização das SNP's

##### 3.1.1 Potencial Zeta ( $\zeta$ )

As nanopartículas apresentaram tamanho em uma faixa de 200 e 220nm (Figura 1). Nanopartículas de  $\text{MoS}_2$  de formato esférico, por exemplo, apresentam maior faixa de distribuição, variando entre 20 a 350nm, a depender do processo de produção (BERNARDI, 2011). Nanografites apresentam tamanho em torno de 400-450nm (OLIVEIRA et. al., 2016).

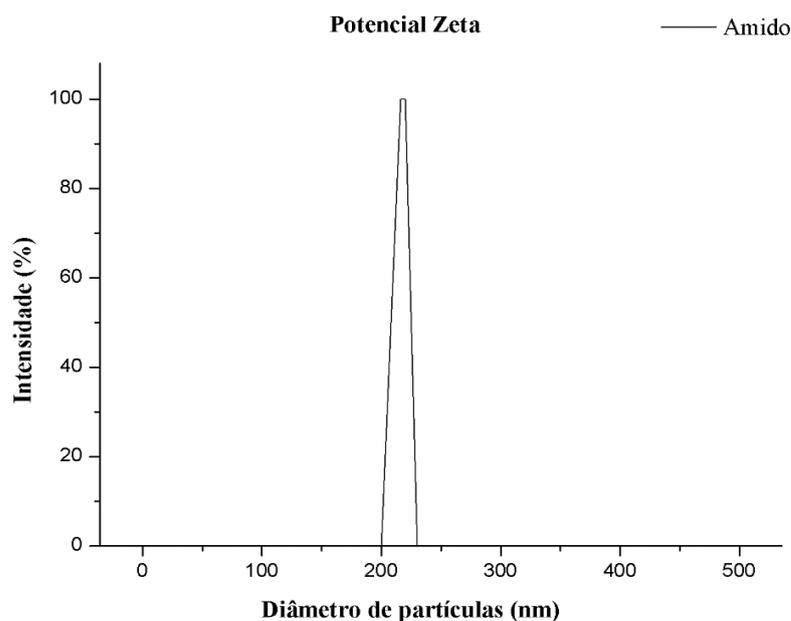


Figura 1 - Gráfico Potencial Zeta

A partir da tabela abaixo (Tabela 1), podemos observar o valor do potencial Zeta  $\zeta$ ,

medido em mV

Nº amostra	Potencial Zeta ( $\zeta$ ) (mV)
1	-41,9
2	-46,8
3	-45,6
<b>Resultado (<math>\bar{\zeta} \pm \Delta\zeta</math>)</b>	<b>(-44,76 <math>\pm</math> 2,55)</b>

Tabela 1 - Potencial Zeta ( $\zeta$ )

Esta análise indica o valor do potencial de superfície das nanopartículas dispersas no fluido, para conferir a estabilidade da suspensão. É interessante que este valor esteja acima de 30 mV (positivo ou negativo), para que a repulsão eletrostática entre as nanopartículas seja o suficiente para mantê-las dispersas de modo estável (SANTOS, 2015). Assim, como o valor do potencial zeta ficou em torno de -45 mV, a dispersão com nanopartículas de amido é considerada estável, o que pode permitir uma dispersão homogênea no fluido lubrificante.

### 3.1.2 Análise termogravimétrica (TGA)

Os resultados obtidos através da TGA estão descritos na Figura 2, onde mostra a curva característica da análise termogravimétrica, correlacionando a perda de massa da amostra (expressa em % de massa residual) em função da temperatura.

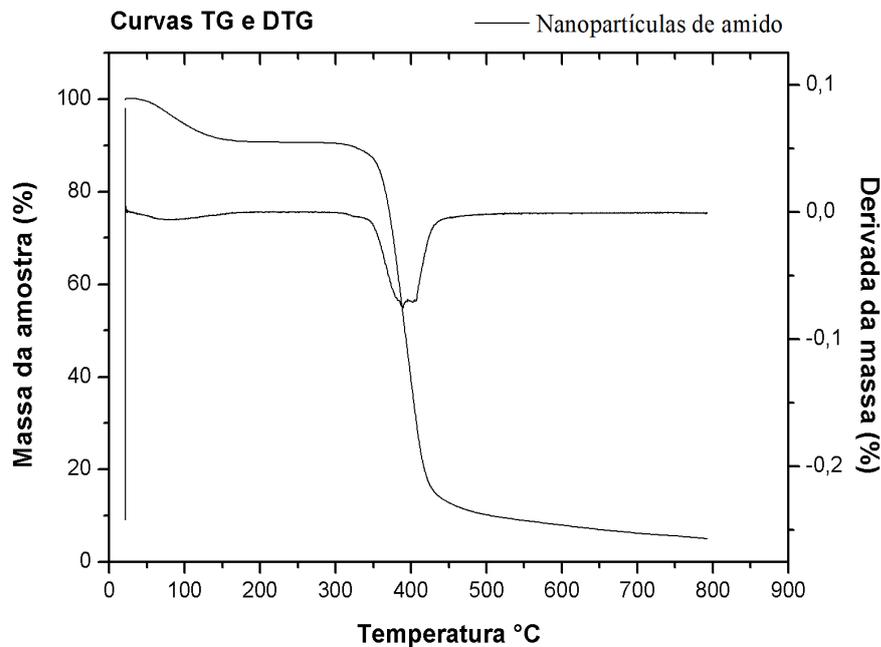


Figura 2 – Curvas TG e DTG das nanopartículas de amido.

Pelas curvas de TG e DTG, observa-se dois eventos de perda de massa. O primeiro evento pode ser associado à perda de umidade da amostra, ocorrendo até 110°C. O segundo evento corresponde à degradação do amido, iniciando a perda de massa em aproximadamente em 340°C. Assim, pode-se inferir que as SNP's apresentam estabilidade térmica em aproximadamente 340°C. Nanolubrificantes a base de nanocompósitos de polipropileno/grafite possuem resistência térmica em torno de 300 à 440°C (KALINKE; ZARBIN, 2014). Os nanotubos de carbono apresentam estabilidade térmica em aproximadamente 400°C (MONTAGNA, 2010). Mesmo apresentando estabilidade térmica um pouco inferior às nanopartículas utilizadas mais comumente como nanolubrificantes, as SNP's mostram potencial térmico para serem estudadas como aditivo a lubrificantes.

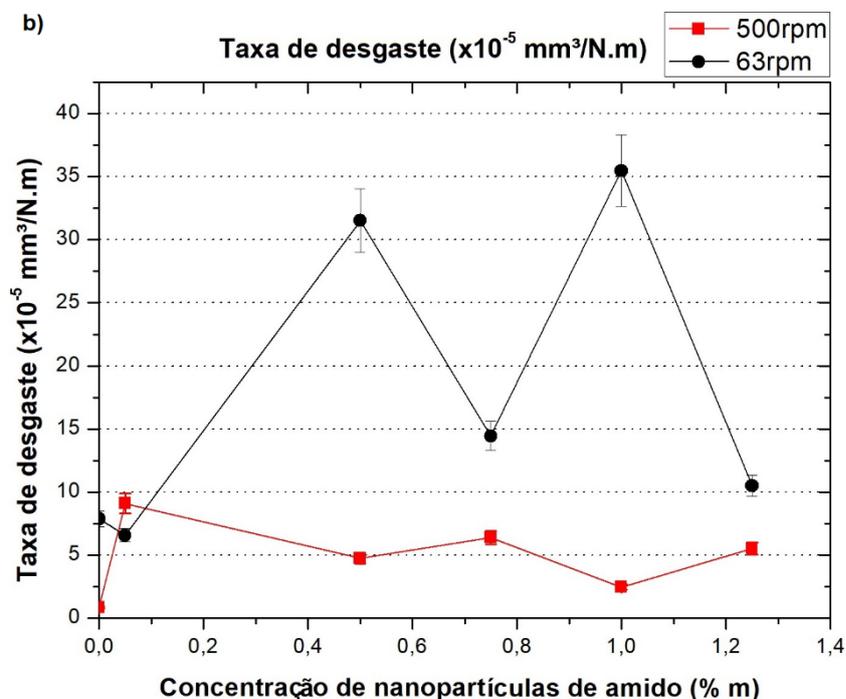
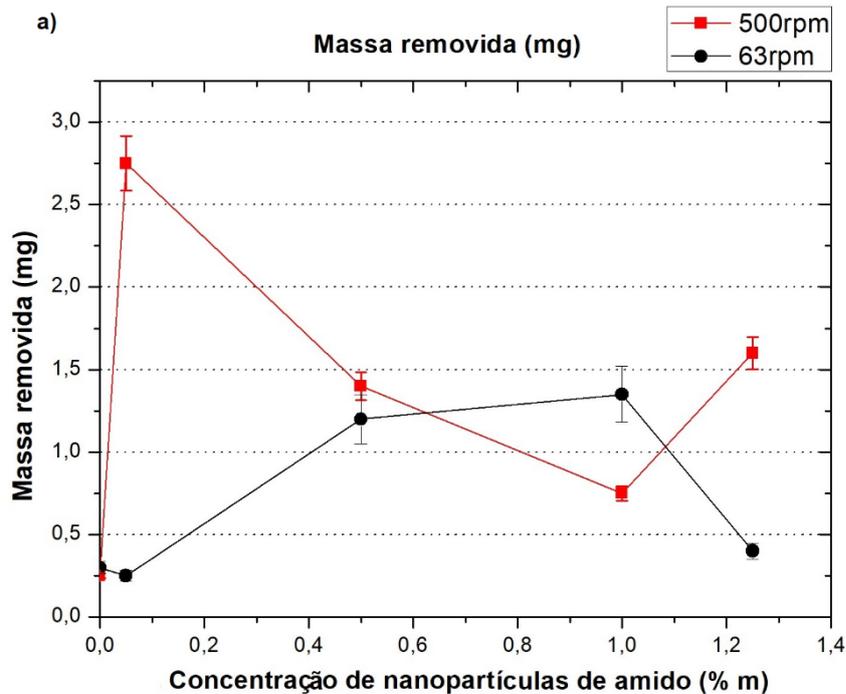
### 3.2 Teste pino-disco

Um dinamômetro acoplado no sistema montado para a execução do teste pino-disco permitiu mensurar a intensidade da força de atrito do processo, e determinar o coeficiente de atrito ( $\mu$ ). Na tabela 2 estão expressos os valores médios de perda de massa com o nanolubrificante (Rocol® Ultracut 250 + SNP)

<b>Teste pino-disco Tempo: 15min   Carga: 8,66N</b>		
<b>Rotação (rpm)</b>	<b>Especificação do teste</b>	<b>Resultado (<math>\bar{m} \pm \Delta m</math>) (mg)</b>
<b>63</b>	Rocol® Ultracut 250	0,40±0,20
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>0,05%</sub> .	0,20±0,10
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>0,50%</sub> .	0,80±0,60
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>1,00%</sub> .	0,90±0,60
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>1,25%</sub> .	0,30±0,17
<b>500</b>	Rocol® Ultracut 250	0,40±0,30
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>0,05%</sub> .	4,20±2,60
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>0,50%</sub> .	1,40±0,20
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>1,00%</sub> .	1,00±0,40
	Rocol® Ultracut 250 + SNP <sub>1,25%</sub> .	1,60±0,15

Tabela 2 - Massa removida de cada teste pino-disco com os nanolubrificantes

A adição de SNP's ao lubrificante aumentou a remoção de massa, nas duas rotações. Para o teste a 63rpm, é possível observar que houve um aumento gradual na massa removida entre as concentrações de 0,05 e 1,00% de SNP's; porém, para 1,25% não houve alteração da massa removida, se comparadas ao teste com Rocol® Ultracut 250 puro. No teste com rotação de 500rpm, observa-se que a adição de 0,05% de SNP's causou um aumento abrupto da remoção de massa e, logo depois, um decréscimo para as concentrações seguintes; exceto, para 1,25% (Figura 3a). Talvez a quantidade de SNP's referente a 0,05% foi o suficiente para provocar interações físico-químicas capazes de retirar maior material que as demais.



A taxa de desgaste (Figura 3b) na rotação de 63rpm apresenta maiores valores. Como a taxa de desgaste também depende da distância percorrida (ver Equação 1), justifica que para essa rotação apresente maiores valores mesmo com menor massa removida, se comparada aos testes a 500rpm. Interessante observar a taxa de desgaste aumentou em cerca de 400% para as concentrações de 0,50 e 1,00% de SNP's. Quando observamos os testes a 500rpm, vemos que a taxa de desgaste aumentou em mais de 1000% com a adição de 0,05% de SNP's; para a concentração de 1,25%, a taxa aumentou em cerca de 665%. Com base nesses resultados, pode-se inferir que as nanopartículas de amido têm caráter abrasivo, pois ajudam na remoção de material da peça, em determinadas concentrações.

Na Figura 4 percebe-se que, para os testes a 63rpm, houve redução significativa do

coeficiente de atrito com adição de 0,05% de SNP's (cerca de 26%) e, para o teste a 500rpm, vemos que houve redução de  $\mu$  em cerca de 35% com adição de 1,25% de SNP's. Analisando os três parâmetros (remoção de massa, taxa de desgaste e coeficiente de atrito), observa-se que para a concentração de 1,25% de SNP's, temos um fluido de corte com ação abrasiva e lubrificante, pois além aumentar a taxa de desgaste, promove a redução do coeficiente de atrito. Portanto a concentração de nanopartículas no lubrificante estudado influencia de forma diferente em cada parâmetro estudado.

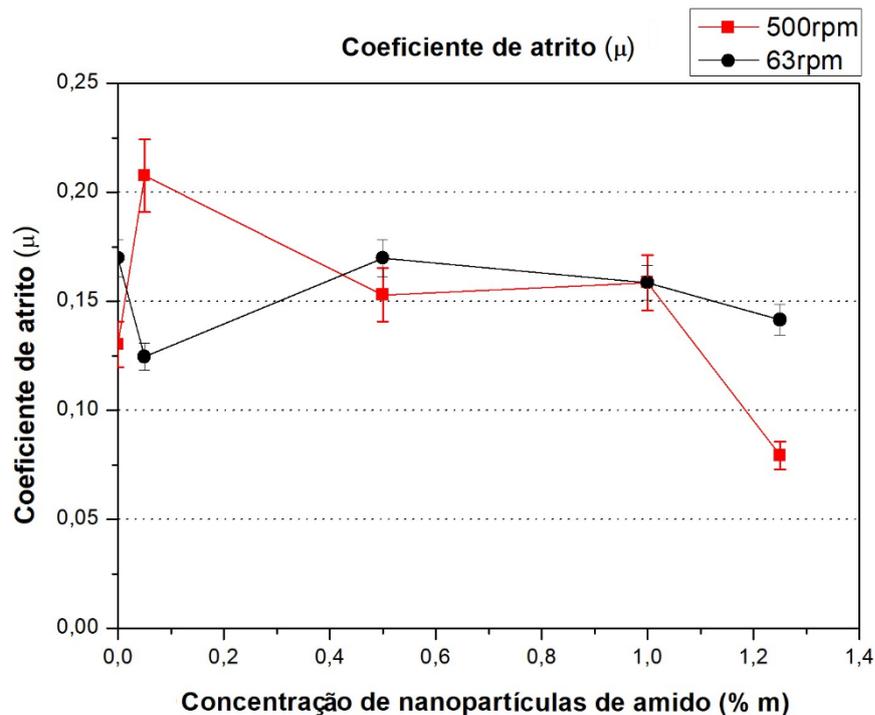


Figura 4 - Gráfico do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) em relação a concentração de SNP's, para as duas rotações.

## 4 | CONCLUSÃO

A síntese de nanopartículas de amido através da hidrólise ácida foi eficiente, assim como sua adição ao lubrificante Rocol® Ultracut 250. De acordo com os resultados do teste tribológico, pode-se inferir que as SNP's têm naturalmente características abrasivas (aumento de  $w$  em até 1100%), mas podendo se comportar como agente deslizante (redução de  $\mu$  em até 35%). Como se trata de nanopartículas biodegradáveis, sem relato do seu uso para esta aplicação, é necessário mais testes para entender seu comportamento.

## REFERÊNCIAS

BERNARDI, C. **Produção e caracterização de nanopartículas de MoS2 e sua estabilização em óleos visando a lubrificação limite**. 2011. 130 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011

CASTRO, R. et al. **Desenvolvimento do sistema de aquisição e supervisão de dados para um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco**. Revista Ciência e Tecnologia, [S.l.], v. 18, n. 32, p. 1-8, jan.

2015.

CHEN, C. S.; CHEN, X. H.; XU, L. S.; YANG, Z.; LI, W. H. **Modification of multi-walled carbon nanotubes with fatty acid and their tribological properties as lubricant additive**. Carbon, Elsevier, PR China, v. 43, n. 8, p. 1660-1666, 13 mar. 2005.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. **Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas**. Ciência Rural, Santa Maria, p. 1-10, out. 2008.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**. 2012. 40 p. Material de Apoio (Curso Teórico/Prático) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012

GONÇALVES, P. M. **Obtenção de nanoamido de pinhão através de hidrólise ácida e ultrassom para incorporação da Nisina**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JULIÃO, J. C. **Estudo comparativo de óleos lubrificantes básicos minerais**. Revista da Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 5-21, dez. 2011.

KALINKE, A. H.; ZARBIN, A. J. G. **Nanocompósitos entre nanotubos de carbono e nanopartículas de platina: preparação, caracterização e aplicação em eletro-oxidação de álcoois**. Quim. Nova, [S.l.], v. 36, n. 8, p. 1289-1296, jun. 2014.

MAIA, D. A. S. et. al. **Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade**. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 4., 2007, Campina: ABPG, 2007. p. 1-10.

MONTAGNA, L. S. **Síntese de nanocompósitos de polipropileno/grafite obtidos por meio da polimerização in situ**. 2010. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

NETO, W. B. **Parâmetros de qualidade de lubrificantes e óleo de oliva através de espectroscopia vibracional, calibração multivariada e seleção de variáveis**. 2005. 130 p. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

OLIVEIRA, A. M. et al. **Nanolubrificantes: caracterização de óleo lubrificante modificado com nanografite**. Tecnologia e Inovação, Revista IPT, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-47, ago. 2016.

RADI, P. A.; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J. **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, ano 2007, 2007.

SANTOS, C. C. **Síntese de nanopartículas de sulfeto de cobre, preparação e estabilidade coloidal de fluidos trocadores de calor em meio aquoso**. 2015. 85 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Química, 2015.

SOUSA, E. H. V. **Obtenção e caracterização de nanolubrificantes utilizados em refrigeração aditivados com nanopartículas de Índio** (In). 2017. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

## UTILIZAÇÃO DE COATINGS DE QUITOSANA NA CONSERVAÇÃO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum*)

Data de aceite: 02/06/2020  
Data de submissão: 05/02/2020

### Luciano Pighinelli

Biomatter Pesquisa e desenvolvimento de Biomateriais

Porto Alegre – Rio Grande do Sul

[https://www.cnpq.br/cvlattesweb/PKG\\_MENU.menu?f\\_cod=055D56A2DBA373E5F707647FB899C09](https://www.cnpq.br/cvlattesweb/PKG_MENU.menu?f_cod=055D56A2DBA373E5F707647FB899C09)

### Anderson Rockenbach

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/3395416687492261>

### Pamela Persson

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/3261192526337811>

### Renata Cardoso Pospichil

Universidade Luterana do Brasil

Canoas – Rio Grande do Sul

<http://lattes.cnpq.br/4096936612522324>

**RESUMO:** Grandes quantidades de alimentos são desperdiçadas todos os dias, devido a condições precárias de armazenagem, longas distâncias até o ponto de venda, entre outros fatores. A utilização de biopolímeros na indústria alimentícia é uma alternativa aos conservantes ou embalagens

sintéticas derivadas de petróleo utilizados atualmente. Estes prolongam sua vida útil a um custo relativamente baixo, já que vários deles são produzidos a partir de resíduos de outras atividades. Neste trabalho testamos a eficácia de coatings de quitosana, produto derivado de resíduos da indústria pesqueira, no prolongamento da vida útil de tomates, através da formação de finas películas (coatings) em torno do alimento, reduzindo a perda de massa e consequente perda de suas propriedades organolépticas. Os testes mostraram que uma solução de quitosana com ph 6 e 3% de glicerol reduz em cerca de 34,71% a perda de massa nos tomates mantidos sob refrigeração e em 22,82% nas amostras mantidas à temperatura ambiente, após um período de 28 dias, mantendo -se aptos para o consumo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desperdício, biopolímeros, coatings, quitosana, tomates.

CHITOSAN COATINGS UTILIZATION IN THE POST-HARVEST CONSERVATION OF TOMATOES (*Solanum lycopersicum*)

**ABSTRACT:** Large amounts of food are wasted every day, due to poor storage conditions, long distances to the point of sale, among other factors. The use of biopolymers in the food industry is an alternative to the

food preservatives or synthetic packages derived from petroleum used today. These extend their useful life at a relatively low cost, because several of them are produced from waste from other activities. In this work we test the effectiveness of chitosan coatings, a product derived from the fishing industry waste, in extending the useful life of tomatoes, through the formation of thin films (coatings) around the food, reducing the weight loss and consequent loss of its organoleptic properties. Tests have shown that a chitosan solution with ph 6 and 3% glycerol reduces by 34.71% the weight loss in tomatoes kept under refrigeration, and by 22.82% in samples kept at room temperature, after a period of 28 days, keeping fit for consumption.

**KEYWORDS:** Waste, biopolymers, coatings, chitosan, tomatoes.

## 1 | INTRODUÇÃO

O desperdício é um grande problema na cadeia produtiva de alimentos, visto que, com o intenso crescimento populacional observado nas últimas décadas, a demanda para suprir a fome da população se torna cada vez maior. Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), um terço de todo alimento produzido no mundo se perde antes de chegar ao consumidor final [1]. Uma solução interessante para esse grave problema é a utilização de biopolímeros, que atuam formando uma fina camada em torno do alimento, mantendo suas características por mais tempo.

Para a utilização comercial destes biopolímeros, é necessário que estes sejam renováveis, abundantes e de baixo custo, além de não afetarem a saúde humana, para que possam ser uma alternativa viável às embalagens sintéticas, derivadas de petróleo, utilizadas atualmente em alimentos [3,4]. Estes polímeros sintéticos são resistentes à degradação, e permanecem por longos períodos no ambiente, causando diversos problemas ambientais, como a morte de animais marinhos pela ingestão destas embalagens. [5]

Diferentes biopolímeros vêm sendo estudados nos últimos anos para essas aplicações como, por exemplo, celulose, amido, pectina, alginato, gelatina e quitosana. [6-30]. Estes devem possuir algumas propriedades específicas, tais como, criar uma barreira física que diminua a interação do alimento com o ambiente externo, reduzindo a desidratação em alimentos frescos ou ainda evitando o contato da umidade do ar com alimentos secos [3].

Nos últimos anos, a quitosana tem sido alvo de diversos estudos para a sua aplicação na indústria alimentícia. A quitosana é o segundo biopolímero mais abundante no mundo, atrás apenas da celulose, sendo encontrada em fungos, escamas de peixes e carapaças de invertebrados. É atóxica, biocompatível e biodegradável, o que a torna apropriada para a utilização em alimentos, já que não causa riscos à saúde e ao meio ambiente [33]. Além disso, pode ser extraída de resíduos da indústria pesqueira, reaproveitando um material que seria descartado no meio ambiente, para gerar um coproduto de grande potencial em diversas áreas [32].

Estudos demonstraram que a quitosana possui propriedades antioxidantes [34,35], antibacterianas [20,21], regula a taxa de respiração e reduz a perda de massa do alimento [11,25], características que estendem a sua vida útil, já que mantêm suas características físicas, como textura, firmeza e cor, por exemplo, por um período maior, sendo estes alguns

dos principais fatores levados em consideração pelo consumidor para avaliar a qualidade do alimento [20,27].

As diferentes propriedades da quitosana podem ser melhoradas, variando concentrações [36], pH, características físico-químicas da matéria-prima [37], ou com a adição de diferentes compostos, de acordo com a característica a ser aprimorada. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento da perda de massa em amostras de tomates, analisando o efeito do pH e da adição de glicerol na formulação do coating. Os testes foram realizados a temperatura ambiente, de aproximadamente 25° C, para simular condições reais de exposição à que os tomates são submetidos até sua comercialização, e sob refrigeração, condição ideal de armazenagem, que inibe o desenvolvimento de microrganismos.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Reagentes

A quitosana utilizada possui um grau de desacetilação de 87,5%, teor de umidade de 12,4% e peso molecular de 150 kDa, obtida da Polymar Ciência e Nutrição S/A, Brasil. Hidróxido de sódio, com concentração de 97%, e glicerol com concentração de 99,5% foram obtidos da Dinâmica Química Contemporânea Ltda, Brasil. Ácido acético glacial, com concentração de 99,7% foi obtido da Química Moderna Ltda, Brasil. Todos os reagentes foram utilizados como foram recebidos, sem purificação posterior.

### 2.2 Soluções para testes

Na primeira fase de testes foi utilizada solução de quitosana com 1% de polímero em solução ácida com 0,4% w/w de ácido acético. A dissolução foi feita adicionando lentamente a solução ácida sob agitação constante a 1000 rpm, a temperatura ambiente, durante cerca de 1 hora. O pH das diferentes soluções foi ajustado adicionando lentamente solução de hidróxido de sódio 0,4%, sob agitação constante a 1000 rpm e temperatura ambiente [30]. Foram preparadas seis diferentes soluções, conforme a figura 1. Foi avaliado o comportamento dos coatings de quitosana em três pH's diferentes, com e sem a adição de 3% v/v glicerol, que atua como agente plastificante da película de quitosana que se forma em torno do alimento, melhorando sua elasticidade e permeabilidade. [31]

Solução	pH	% Glicerol (v/v)
A	4,7	-
B	6	-
C	7	-
D	4,7	3
E	6	3
F	7	3

Figura 1: Formulação das diferentes soluções empregadas na formação de coatings de quitosana.

### 2.3 Preparação das amostras

Para a realização dos testes foram utilizados tomates do tipo italiano (*Solanum lycopersicum*), adquiridos em um comércio nas proximidades do laboratório, todos no início da fase de maturação, selecionados para garantir uniformidade no grau de maturação, tamanho, e evitar amostras com danos, como perfurações ou choques físicos. Para testar a eficácia das soluções no controle da perda de massa dos tomates, foram utilizados grupos de três amostras para cada solução diferente, sendo que em cada teste três amostras foram mantidas inalteradas, atuando como padrão de comparação. Todas as amostras foram acondicionadas em placas de petri, sem qualquer proteção adicional além dos coatings de quitosana, para simular condições reais de armazenagem e exposição praticadas no comércio ou em domicílios. Os testes foram realizados à temperatura ambiente a cerca de 25° C e sob refrigeração, a cerca de 12°C.

Cada fruta foi inicialmente lavada com solução 1% v/v de hipoclorito de sódio, para retirar qualquer contaminante ou microrganismo que pudesse interferir nos resultados do experimento. Estes foram secos à temperatura ambiente e então imersos na solução correspondente por cerca de 30 segundos. Foram então secos à temperatura ambiente por cerca de 30 minutos, para permitir a formação do coating em torno do alimento, e que toda a água das soluções evaporasse e não interferisse nas medições de massa posteriores.

### 2.4 Análise da perda de massa

Após preparadas as amostras, estas foram pesadas para estabelecer o valor de referência de massa de cada uma delas. Para quantificar a perda de massa média das amostras de tomate ao longo do tempo, cada uma delas foi pesada em intervalos de uma semana, por quatro semanas. O tempo de duração do experimento foi determinado considerando que, ao final de quatro semanas (28 dias), alguns tomates já começavam a se deteriorar, o que poderia afetar as propriedades de barreira física dos coatings contra a perda de massa.

Para determinar a eficácia dos coatings de quitosana na redução da perda de massa nos tomates, foi utilizada a equação 1, onde (%) é a perda de massa porcentual, A é a média de massa inicial e B é a média de massa final do grupo analisado.

$$(\%) = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Equação 1: Cálculo da perda média de massa de cada grupo [28]

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

No teste realizado sob refrigeração, todos os diferentes coatings avaliados apresentaram resultados favoráveis na redução da perda de massa das amostras. Entre eles destacou-se o coating formado pela solução de sal de quitosana com ph 6, à qual foi adicionado 3% em volume de solução de glicerina. Como mostra a figura 2, enquanto as amostras de controle perderam em média 21,32% de massa após o período de 28 dias, as amostras cobertas com essa solução tiveram uma redução de apenas 13,92% de massa após o período do teste.



Figura 2: Perda média de massa das amostras mantidas sob refrigeração após 28 dias.

A figura 2 mostra que a perda de massa é praticamente linear nas amostras envoltas com os coatings, enquanto as amostras de controle apresentam um comportamento mais instável, já que a taxa de variação da curva muda significativamente ao longo do tempo.

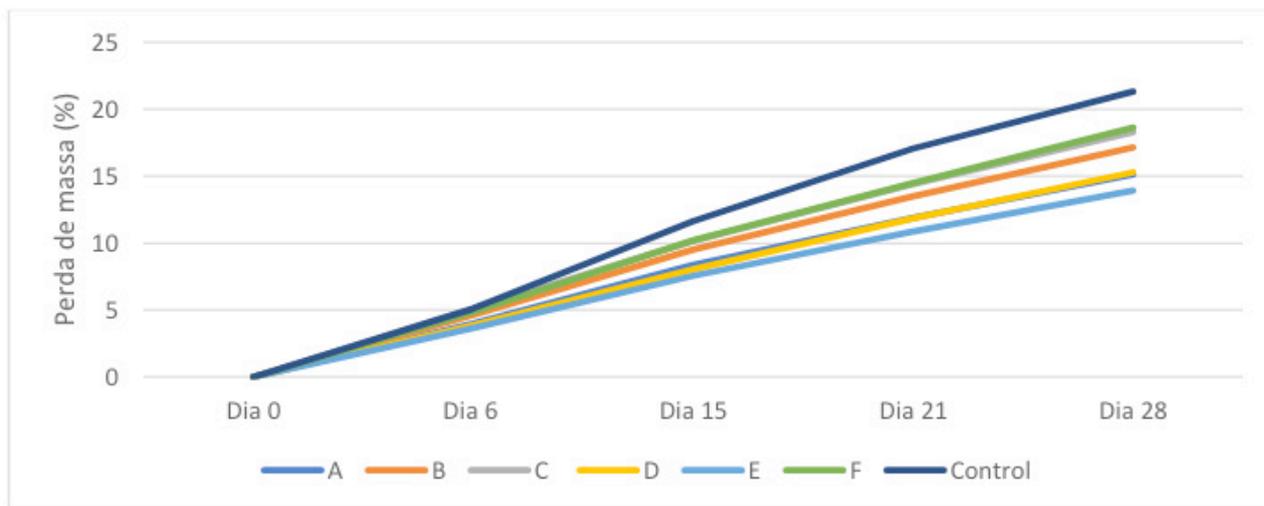


Figura 2: Curva de perda de massa das amostras mantidas sob refrigeração ao longo do tempo.

O teste realizado a temperatura ambiente, em torno de 25°C, apresentou resultados semelhantes, onde todas as soluções apresentaram redução de perda de massa em relação às amostras de controle, à exceção da solução D, que apresentou resultados inferiores. Entre elas destacou-se novamente a solução E. Como mostra a figura 3, enquanto as amostras de controle perderam em média 13,79% de massa após o período de 28 dias, as amostras cobertas com essa solução tiveram uma redução de apenas 9,31%, uma redução de cerca de 22,82% em relação às amostras de controle.

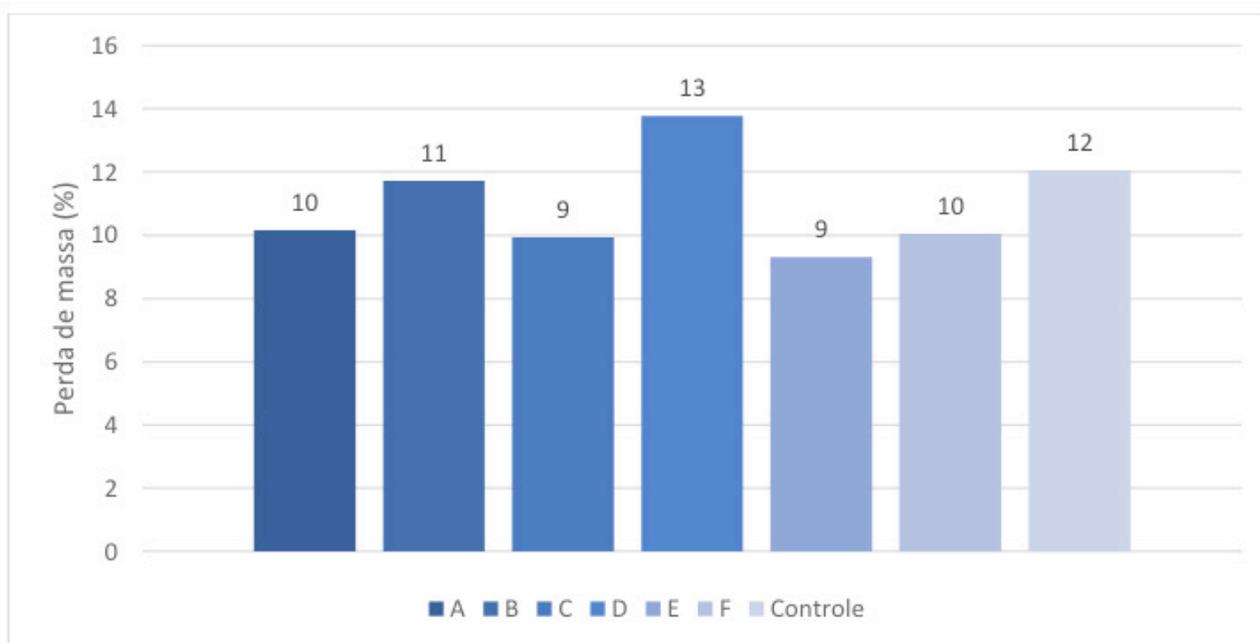


Figura 3: Perda média de massa das amostras mantidas à temperatura ambiente após 28 dias.

A figura 4 indica que há redução na linearidade da perda de massa das amostras em relação às mantidas sob refrigeração, o que é explicado pelo fato destas amostras não estarem em um ambiente controlado e por isso serem suscetíveis às variações de

temperatura e umidade do ambiente, que explicam as diferentes taxas de variação de perda de massa a cada semana.

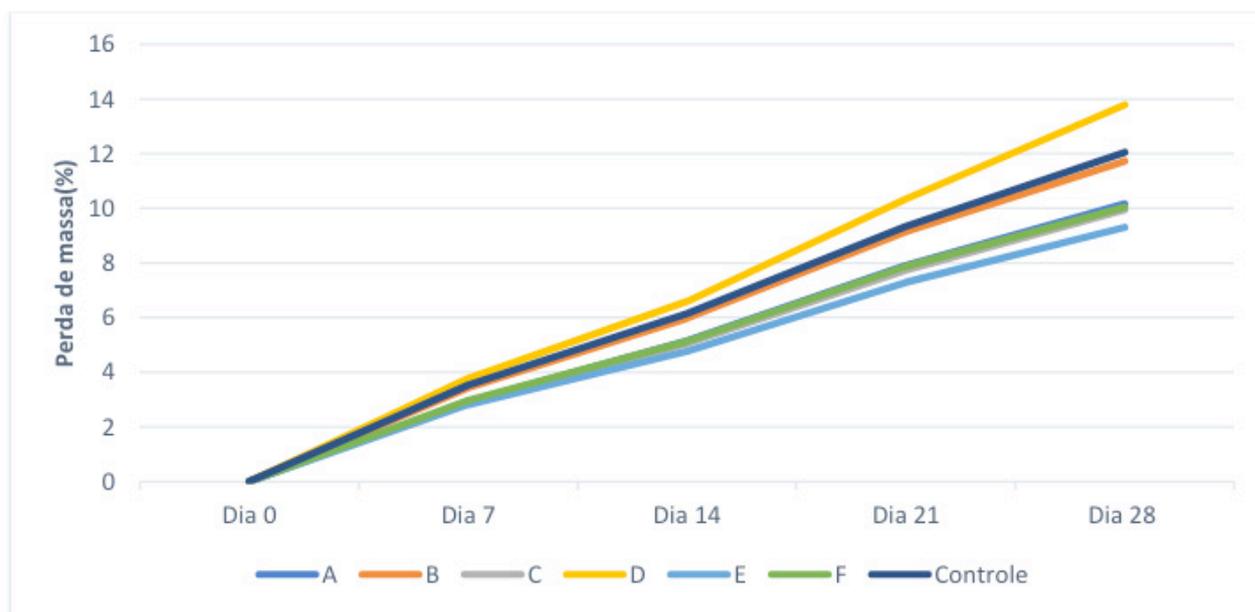


Figura 4: Curva de perda de massa das amostras mantidas à temperatura ambiente ao longo do tempo.

#### 4 | CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que coatings de quitosana apresentam grande eficiência na redução de perda de massa e manutenção das características físicas de tomates, tanto sob refrigeração quanto à temperatura ambiente. Os melhores resultados foram obtidos com a solução E, que reduziu a perda de massa em cerca de 22,82% nas amostras mantidas à temperatura ambiente e em cerca de 34,71% nas amostras mantidas sob refrigeração.

Testes realizados anteriormente no laboratório Biomatter demonstraram que a partir de pH 6 há a aglutinação do sal de quitosana em quitosana nanocristalina, onde a redução do tamanho de partícula aumenta a reatividade e a hidrofilia da molécula. Em pH 7 todo sal é convertido em QNC. A eficiência dos coatings de quitosana em manter as amostras de tomate com suas características inalteradas é muito importante na prática, já que tomates são frutas sensíveis e extremamente perecíveis. O comércio utiliza extensivamente a refrigeração para mantê-los com boa aparência durante o tempo de estocagem. O coating formado pela solução E permite que este tempo de armazenamento possa se estender, reduzindo perdas durante esse período já que, no ato da compra, o consumidor avalia majoritariamente a aparência física da fruta que, se não estiver em perfeitas condições, na maioria dos casos, acaba sendo desperdiçada, mesmo que ainda esteja apta para o consumo.

## REFERÊNCIAS

- [1] (FAO), Food And Agriculture Organization Of The United Nations. **Food Loss and Food Waste**. 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.
- [2] ATARÉS, Lorena; CHIRALT, Amparo. **Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging**. Trends in Food Science & Technology, [s.l.], v. 48, p.51-62, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.001>.
- [3] CAZÓN, Patricia et al. **Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review**. Food Hydrocolloids, [s.l.], v. 68, p.136-148, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>.
- [4] SHIT, Subhas C.; SHAH, Pathik M.. **Edible Polymers: Challenges and Opportunities**. Journal Of Polymers, [s.l.], v. 2014, p.1-13, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/427259>.
- [5] LI, W.c.; TSE, H.f.; FOK, L.. **Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects**. Science Of The Total Environment, [s.l.], v. 566-567, p.333-349, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>.
- [6] SCARFATO, Paola; MAIO, Luciano di; INCARNATO, Loredana. **Recent advances and migration issues in biodegradable polymers from renewable sources for food packaging**. Journal Of Applied Polymer Science, [s.l.], v. 132, n. 48, p.1-11, 16 jul. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.42597>.
- [7] DICASTILLO, Carol López de et al. **Cross-linked methyl cellulose films with murta fruit extract for antioxidant and antimicrobial active food packaging**. Food Hydrocolloids, [s.l.], v. 60, p.335-344, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.020>.
- [8] GALVÃO, Andréssa M.m.t. et al. **Edible coating based on modified corn starch/tomato powder: Effect on the quality of dough bread**. Lwt, [s.l.], v. 89, p.518-524, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.027>.
- [9] RAMOS, Marina et al. **Gelatin-Based Films and Coatings for Food Packaging Application**. [s.l.], v. 6, n. 4, p.41-61, 28 set. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/coatings6040041>.
- [10] TREVIÑO-GARZA, Mayra Z. et al. **Layer-by-layer edible coatings based on mucilages, pullulan and chitosan and its effect on quality and preservation of fresh-cut pineapple ( Ananas comosus )**. Postharvest Biology And Technology, [s.l.], v. 128, p.63-75, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.007>.
- [11] LIU, Kaidong et al. **Combined effects of ascorbic acid and chitosan on the quality maintenance and shelf life of plums**. Scientia Horticulturae, [s.l.], v. 176, p.45-53, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.06.027>.
- [12] HIGUERAS, Laura et al. **Development of a novel antimicrobial film based on chitosan with LAE (ethyl-Nα-dodecanoyl-l-arginate) and its application to fresh chicken**. International Journal Of Food Microbiology, [s.l.], v. 165, n. 3, p.339-345, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.003>.
- [13] PRIYA, D. Shanmuga et al. **Chitosan-incorporated different nanocomposite HPMC films for food preservation**. Journal Of Nanoparticle Research, [s.l.], v. 16, n. 2, p.1-16, 22 jan. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11051-014-2248-y>.
- [14] YU, Youwei et al. **Jujube preservation using chitosan film with nano-silicon dioxide**. Journal Of Food Engineering, [s.l.], v. 113, n. 3, p.408-414, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.021>.
- [15] KHALIFA, Ibrahim et al. **Preserving apple (Malus domestica var. Anna) fruit bioactive substances using olive wastes extract-chitosan film coating**. Information Processing In Agriculture, [s.l.], v. 4, n. 1,

p.90-99, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.inpa.2016.11.001>.

[16] AYÓN-REYNA, Lidia E. et al. **Effectiveness of Hydrothermal-Calcium Chloride Treatment and Chitosan on Quality Retention and Microbial Growth during Storage of Fresh-Cut Papaya**. *Journal Of Food Science*, [s.l.], v. 80, n. 3, p.594-601, 27 jan. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.12783>.

[17] CISSÉ, Mohamed et al. **Preservation of mango quality by using functional chitosan-lactoperoxidase systems coatings**. *Postharvest Biology And Technology*, [s.l.], v. 101, p.10-14, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.11.003>.

[18] CAMATARI, Fabiana Oliveira dos Santos et al. **Impact of edible coatings based on cassava starch and chitosan on the post-harvest shelf life of mango (*Mangifera indica*) 'Tommy Atkins' fruits**. *Food Science And Technology*, [s.l.], 26 out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457x.16417>.

[19] TREVIÑO-GARZA, Mayra Z. et al. **Edible Active Coatings Based on Pectin, Pullulan, and Chitosan Increase Quality and Shelf Life of Strawberries (*Fragaria ananassa*)**. *Journal Of Food Science*, [s.l.], v. 80, n. 8, p.1823-1830, 17 jul. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.12938>.

[20] DEVLIEGHERE, F; A VERMEULEN,; DEBEVERE, J. **Chitosan: antimicrobial activity, interactions with food components and applicability as a coating on fruit and vegetables**. *Food Microbiology*, [s.l.], v. 21, n. 6, p.703-714, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2004.02.008>.

[21] FERNANDEZ-SAIZ, P.; LAGARON, J.m.; OCIO, M.j.. **Optimization of the biocide properties of chitosan for its application in the design of active films of interest in the food area**. *Food Hydrocolloids*, [s.l.], v. 23, n. 3, p.913-921, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.06.001>.

[22] LI, Jian et al. **Preventing the wound-induced deterioration of Yali pears by chitosan coating treatments**. *Food Science And Technology International*, [s.l.], v. 18, n. 2, p.123-128, 13 mar. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1082013211414774>.

[23] YAN, Chunqi; GE, Xizhen; TIAN, Pingfang. **Disease control during peach preservation with a berberine-chitosan composite membrane**. *Fruits*, [s.l.], v. 67, n. 4, p.277-284, 28 jun. 2012. International Society for Horticultural Science (ISHS). <http://dx.doi.org/10.1051/fruits/2012020>.

[24] DUTTA, J.; TRIPATHI, S.; DUTTA, P.k.. **Progress in antimicrobial activities of chitin, chitosan and its oligosaccharides: a systematic study needs for food applications**. *Food Science And Technology International*, [s.l.], v. 18, n. 1, p.3-34, 27 set. 2011. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1082013211399195>.

[25] PAGNO, Carlos Henrique et al. **The nutraceutical quality of tomato fruit during domestic storage is affected by chitosan coating**. *Journal Of Food Processing And Preservation*, [s.l.], v. 42, n. 1, 28 abr. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13326>.

[26] RUZAINA, Ishak et al. **Effect of Different Degree of Deacetylation, Molecular Weight of Chitosan and Palm Stearin and Palm Kernel Olein Concentration on Chitosan as Edible Packaging for Cherry Tomato**. *Journal Of Food Processing And Preservation*, [s.l.], v. 41, n. 4, 14 set. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13090>

[27] WON, Jin Sung et al. **Edible Coating Using a Chitosan-Based Colloid Incorporating Grapefruit Seed Extract for Cherry Tomato Safety and Preservation**. *Journal Of Food Science*, [s.l.], v. 83, n. 1, p.138-146, 11 dez. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.14002>.

[28] BENHABILES, M. S. et al. **Assessment of coating tomato fruit with shrimp shell chitosan and N,O-carboxymethyl chitosan on postharvest preservation**. *Journal Of Food Measurement And Characterization*, [s.l.], v. 7, n. 2, p.66-74, 12 maio 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11694-013-9140-9>.

- [29] GAO, Pisheng; ZHU, Zhiqiang; ZHANG, Ping. **Effects of chitosan–glucose complex coating on postharvest quality and shelf life of table grapes.** Carbohydrate Polymers, [s.l.], v. 95, n. 1, p.371-378, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.029>.
- [30] Pighinelli L, Guimarães MF, Becker CM, Zehetmeyer G, Rasia MG, et al. (2016) **Structure and Properties of Nanocrystalline Chitosan.** J Appl Biotechnol Bioeng 1(1): 00003. DOI: 10.15406/jabb.2016.01.00003
- [31] RIVERO, S. et al. **An Insight into the Role of Glycerol in Chitosan Films.** Food Biophysics, [s.l.], v. 11, n. 2, p.117-127, 22 jan. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11483-015-9421-4>.
- [32] SILVA, Matheus et al. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Indústria Pesqueira para Produção de Biomateriais.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 7., 2017, Ponta Grossa. Resumo. S.l.: Associação Paranaense de Engenharia de Produção, 2017.
- [33] YOUNES, Islem; RINAUDO, Marguerite. **Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications.** Marine Drugs, [s.l.], v. 13, n. 3, p.1133-1174, 2 mar. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/md13031133>.
- [34] RANCIBIA, Mirari Y. et al. **Antimicrobial and antioxidant chitosan solutions enriched with active shrimp (*Litopenaeus vannamei*) waste materials.** Food Hydrocolloids, [s.l.], v. 35, p.710-717, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.026>.
- [35] SCHREIBER, Stephanie B. et al. **Introduction of primary antioxidant activity to chitosan for application as a multifunctional food packaging material.** Food Hydrocolloids, [s.l.], v. 33, n. 2, p.207-214, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.03.006>.
- [36] ALI, Asgar et al. **Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica papaya L.*) fruit during cold storage.** Food Chemistry, [s.l.], v. 124, n. 2, p.620-626, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.085>.
- [37] JONGSRI, Pornchan et al. **Effect of molecular weights of chitosan coating on postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruit.** Lwt, [s.l.], v. 73, p.28-36, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j>

## ANÁLISE METALOGRÁFICA DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DO AÇO AISI 1050 USADO NA HASTE DE DIREÇÃO DE UMA MÁQUINA AGRÍCOLA DA SÉRIE 8R

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

### **Vagner dos Anjos Costa**

Universidade Federal de Sergipe – UFS  
Aracaju – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/4412571965028358>

### **Fábio Santos de Oliveira**

Universidade Federal de Sergipe  
Aracaju – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/8074611486281695>

### **Sílvio Leonardo Valença**

Centro Universitário Estácio de Sergipe  
Aracaju- Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/6962455172100547>

### **Gabriela Oliveira Valença**

Universidade Federal de Sergipe - UFS  
Aracaju- Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/6957150348405072>

### **Paulo Henrique de Souza Viana**

Centro Universitário Estácio de Sergipe  
Aracaju – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/9107993268855855>

### **João Vítor Chaves Cordeiro**

Centro Universitário Estácio de Sergipe  
Aracaju –Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/2764075917854348>

realizar uma análise metalográfica para caracterização da microestrutura do aço AISI 1050, muito usado na fabricação da haste de direção de máquinas agrícolas. A pesquisa foi realizada de forma quantitativa através da análise com dados mensuráveis por meio de instrumentos em laboratório. As amostras foram preparadas através dos procedimentos da norma da ASTM seguindo o padrão de lixamento e polimento, com o objetivo de remover todos os riscos e imperfeições na superfície, tornando-a plana. Em seguida, a superfície para análise do corpo de prova foi atacada com solução de Nital 2% (ácido nítrico 2% diluído em álcool etílico). Foi aplicada neste trabalho a técnica de microscopia óptica, utilizando-se a iluminação em campo claro. Por fim, com o uso dos fundamentos da análise metalográfica, pode-se observar que o aço AISI 1050 apresenta uma microestrutura composta por ferrita e perlita, características de um aço pro-eutetóide. Além disso a haste apresentou uma dureza de 218 HV após a realização do ensaio de microdureza.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metalografia. Tratamento térmico. Microscopia óptica.

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo

# MATALOGRAPHIC ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE AND MICRODURE OF AISI 1050 STANDARD STEEL USED IN THE STEERING ROD OF N 8R SERIES AGRICULTURAL MACHINE

**ABSTRACT:** This work aims to perform a metallographic analysis to characterize the microstructure of AISI 1050 steel, widely used in the manufacture of the steering rod of agricultural machinery. The research was carried out in a quantitative way through the analysis with measurable data through instruments in laboratory. The samples were prepared using the procedures of the ASTM standard following the standard of sanding and polishing, in order to remove all scratches and imperfections on the surface, making it flat. Then, the surface for analysis of the specimen was attacked with a 2% Nital solution (2% nitric acid diluted in ethyl alcohol). In this work, the optical microscopy technique was applied, using bright field illumination. Finally, using the fundamentals of metallographic analysis, it can be seen that AISI 1050 steel has a microstructure composed of ferrite and perlite, which are characteristic of pro-eutetoid steel. In addition, the rod had a hardness of 218 HV after performing the microhardness test.

**KEYWORDS:** Metallography. Heat treatment. Optics microscopy.

## 1 | INTRODUÇÃO

O estudo sobre os aços tem sido bastante aprofundado ao longo dos anos devido principalmente a diversidade de utilização nos diversos ramos da engenharia, e, estudar a sua microestrutura é importante para entender como as propriedades mecânicas dessas ligas variam à medida que se modifica algum constituinte interno. Visualizar a textura do material nos possibilita evidenciar a granulação de que o material é formado, e conseqüentemente enfatizar conclusões em relação a sua utilização na indústria. Com isso, consegue-se por exemplo, prever a necessidade de se realizar tratamentos térmicos que possibilitem a utilização da liga no ambiente escolhido.

Este trabalho tem como proposta, caracterizar a microestrutura do aço AISI 1050, muito utilizado na fabricação de hastes para a direção de tratores agrícolas, através de análises e ensaios que foram realizados nas amostras retiradas da barra de direção.

Durante a pesquisa foi possível obtermos informações importantes na determinação de características e propriedades do material, as quais se tornaram relevantes para determinar qual o aço utilizado é ideal para este tipo de serviço.

O estudo da microestrutura dos aços é realizado devido a ampla aplicação destes materiais em diversos equipamentos mecânicos, pois conhecer somente as propriedades mecânicas de um determinado aço, não é o suficiente para garantir que o mesmo irá desempenhar suas funções normalmente, sem falar de outros fatores que também influenciam no desempenho destas ligas. Componentes mecânicos podem fraturar e falhar devido aos movimentos severos durante os trabalhos executados, e na maioria das vezes, saber qual a tensão de escoamento ou ruptura do material não é o suficiente para termos garantias do perfeito funcionamento do mecanismo.

Para garantir que um aço funcione sem falhar, além do ensaio de tração temos os ensaios

de impacto, fadiga, dureza e metalográfico. A metalografia tem se destacado nos laboratórios como uma técnica que analisa a microestrutura dos aços, e como essas microestruturas influenciam diretamente no perfeito funcionamento dos materiais e na resistência mecânica.

Helilton Moraes (2013, p. 2) destaca que a metalografia é uma importante ferramenta para o conhecimento destas transformações. O conhecimento da microestrutura assim como seus microconstituintes, é de extrema importância para prever o comportamento do material em determinadas aplicações, garantindo assim o seu desempenho.

A indústria automobilística moderna se preocupa muito com a utilização de aços que possuam boa resistência mecânica, para que garanta o perfeito funcionamento dos seus equipamentos sem causar prejuízos e paradas desnecessárias.

A utilização destes materiais está ligada a sua característica de suportar a oxidação e corrosão nos ambientes mais variados. Existem diversos tipos de aços que se enquadram nestas características, os quais podem ter elementos de ligas diferentes que buscam uma microestrutura ou propriedade específica, porém para serviços severos como os realizados por tratores agrícolas, selecionam-se aços que tenham não somente boa resistência a oxidação e corrosão, mas que possuam alta resistência ao desgaste e suportem vários impactos devidos aos trabalhos bruscos realizado em terrenos agrícolas bastante irregulares.

Callister (2012, p.129) ressalta que em tais situações, é necessário se conhecer as características dos materiais e projetar o membro a partir do qual ele é feito de maneira que qualquer deformação não seja excessiva e não cause fratura. Assim é necessário se conhecer a natureza da carga aplicada e a sua duração, as condições ambientais e condições de trabalho em que o componente está sendo submetido.

. Esta pesquisa trata-se de um estudo de caso realizado em uma haste de direção utilizada em tratores agrícolas, cedida pela empresa Jonh Deere Br fornecedora de máquinas e tratores para a agricultura, com filial localizada em Nossa Senhora do Socorro no estado de Sergipe; e os ensaios foram realizados no laboratório de Microestruturas e Propriedades Mecânicas (LAMP) da Universidade Federal de Sergipe (UFS). A finalidade deste trabalho é caracterizar a microestrutura do aço estudado e verificar o tipo de tratamento térmico utilizado na haste.

Trata-se de um estudo de caso importante em função do excesso de manutenção que existe nestes componentes e por implicar na parada destas máquinas, ocasionando perdas na produção e aumento do custo de manutenção. Para enfatizar isso, focamos na microestrutura do aço, visto que, esta influencia diretamente na dureza e nas propriedades gerais do aço como: ductilidade, tenacidade, resistência ao desgaste e resistência a tração.

Através do estudo da microestrutura percebemos que se trata de um aço constituído de ferrita que se forma antes da temperatura de austenitização (fase pro- eutetóide) caracterizada por ser dúctil e menos resistente quando comparada com outras microestruturas e, além disso existe presença de perlita o que confere ao aço uma boa resistência à tração.

Chiaverini (2012, p.121) ressalta que os aços possuem um ponto eutetóide a 727 °C cujo teor de carbono é de 0,77 %, onde este ponto é de fundamental importância quando se trata no estudo dos seus constituintes internos, uma vez que através deles podemos

classificar os aços.

## 2 | OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Identificar a microestrutura e microdureza presente no aço AISI 1050.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os constituintes microestruturais presentes na haste de direção;
- Verificar quantitativamente a dureza existente.

## 3 | REFERENCIAL TEÓRICO

O Conhecimento da microestrutura de um aço é de fundamental importância para o profissional da engenharia, visto que através dela, os engenheiros podem escolher a liga mais apropriada que será utilizada em suas aplicações de acordo com as necessidades do projeto.

Para Ângelo Fernando Padilha (1997, p.343) “os materiais têm desempenhado um papel importante na história da humanidade. Nas últimas décadas foi possível estabelecer relações quantitativas entre suas composições, microestruturas e suas propriedades”.

No mundo contemporâneo as empresas privam sempre pela redução de custos, e por materiais que lhe tragam garantia de que o trabalho será executado da melhor forma possível e com bastante rentabilidade procurando sempre alinhar produção e segurança, no entanto, para que isso seja possível, as indústrias investem em artefatos que assegurem que os equipamentos utilizados atendam às necessidades do trabalho executado. É natural que após longos ciclos de utilização, os materiais falhem por fadiga, mas em muitos casos é possível prever quantas horas de uso um determinado material solicitado pode sofrer desgaste

Através do estudo sobre esta microestrutura formada, muitos defeitos podem ser evitados além de se produzir materiais que garantam a qualidade necessária para a realização das suas funções na indústria.

### 3.1 Metalografia

Metalografia é o estudo da morfologia e estrutura dos metais. Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal.

Segundo a NBR 15454 a metalografia trabalha com o registro e a constituição de estrutura dos metais e ligas, produtos e compósitos metálicos com o objetivo de relacionar

com as propriedades e os processos de fabricação.

A revelação destes constituintes internos é de fundamental importância porque eles irão influenciar diretamente nas propriedades mecânicas dos aços como: o limite de resistência ao escoamento, ductilidade, tenacidade, elasticidade e plasticidade. Conhecer como o aço se comporta na temperatura ambiente é fundamental para que possamos saber dentre os tipos quais são frágeis, quais são dúcteis, quais devemos utilizar a alta temperatura ou a baixa temperatura e sobre tudo podemos informar ao usuário, até que temperatura a liga pode ser utilizada sem mudar a sua estrutura interna, pois quando mudamos a estrutura interna dos materiais alteramos as suas propriedades mecânicas e conseqüentemente o seu desempenho.

Além disso, é interessante ressaltar que através da metalografia é possível identificar o tipo de tratamento térmico mais adequado para o tipo de solicitação mecânica, outrora o conhecimento dos tratamentos térmicos envolvidos num processo de fabricação as quais as ligas foram submetidas, é essencial para melhorar o desempenho do componente e reduzir riscos de falhas que ocorrem em determinadas estruturas e conseqüentemente ter noções sobre a qualidade técnica do produto.

Callister (2012, p.186) ressalta que “os engenheiros de materiais e metalúrgicos, por outro lado, estão preocupados com a produção e fabricação de materiais para atender às exigências em serviço previstas por essas análises de tensão.

Ainda segundo Callister (2012, p.192) esta análise de tensão “envolve necessariamente o entendimento das relações entre a microestrutura (isto é, as características internas) dos materiais e suas propriedades mecânicas”.

Com o intuito de entender sobre o papel desta microestrutura ressaltada por Callister, a metalografia, hoje, é muito utilizada nos grandes laboratórios, pois, é uma técnica que ajuda a resolver muitos problemas que antes eram de difícil solução, esta técnica contribui para que a indústria possa prever se o seu equipamento irá funcionar com segurança, além de dar garantias aos profissionais que o equipamento projetado estar adequado.

Em síntese, podemos dizer que a metalografia fornece dados como a peça foi feita, o tratamento térmico utilizado, assim como a natureza do material empregado.

### **3.2 Características do aço 1050**

O aço 1050 é um aço de médio teor de carbono que apresenta boas propriedades mecânicas, alto limite de resistência mecânica e tenacidade, e se destaca por ser de fácil usinagem e de boa soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado. Entre as finalidades do aço 1050, envolvem aplicações de eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, engrenagens e componentes estruturais de máquinas. Seu teor de carbono encontra-se em torno de 0,5 %, além disso possui outros elementos importantes na sua estrutura como o Silício, Manganês, Fósforo, Enxofre que faz com que o mesmo tenha um excelente desempenho quando usado.

Segue abaixo a composição química deste aço Tabela 1, avaliado nas amostras realizadas no Laboratório de Microestruturas e de Propriedades Mecânicas (LAMP) da

Elementos	C	Si	Mn	P	S
Amostra	0.52	0.29	0.88	0.011	0.027
AISI 1050	0,45-0,50	0,15-0,50	0,60-0,90	0 - 0,04	0 - 0,05

Tabela 1- Composição química do aço 1050

Fonte: próprio autor (2019)

#### 4 | METODOLOGIA

As análises foram feitas utilizando o aço 1050, liga metálica não magnética, composto de ferro, carbono, silício e manganês. A análise microestrutural foi realizada em plano longitudinal à laminação da liga conforme figura 1 a seguir. A amostra metalográfica foi preparada de acordo com procedimento padrão de lixamento sendo utilizada as lixas de 200, 320, 400, 600, 800 e 1200 e a seguir foi polida em disco rotativo com o auxílio de álcool, depois foi atacada com reativo de Nital 2 % (ácido nítrico 2 % diluído em álcool etílico) por aproximadamente 4 segundos. As imagens da superfície do material foram obtidas através de microscópio óptico (Leica DM2500M) acoplado ao software no computador (Figura 2). Foram realizados ensaios de microdureza (microdurômetro Future Tech FM 800, figura 2) na amostra metalográfica. As medições de microdureza Vickers foram realizadas através de 10 impressões com carga de 1 kgf, partindo da superfície do tarugo e seguindo em direção ao núcleo.



Figura 1-Amostras do aço 1050

Fonte: Próprio autor (2019).



Figura 2- Instrumentos de análise

Fonte: Próprio autor (2019).

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A micrografia obtida para a amostra não submetida a nenhum esforço mecânico, apresentou grãos uniformes com superfícies claras e escuras característicos da ferrita pró-eutetóide (parte clara da figura 3) e colônias de perlita (parte escura da figura 3). A microestrutura apresenta alinhamento devido a laminação da matéria prima. Poucas inclusões de sulfeto de manganês são verificadas. A microdureza encontrada foi de 218 HV1, (desvio padrão de 4,8 HV1) figura 4.

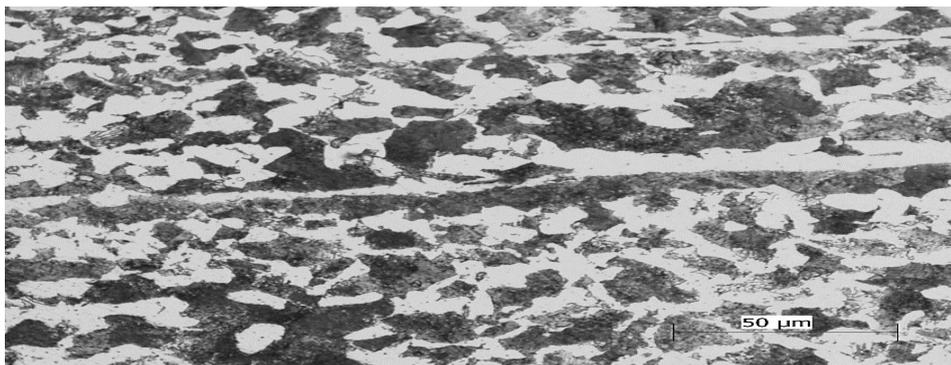


Figura 3- Aço pró-eutetóide.

Fonte: próprio autor (2019).



Figura 4- Microestrutura com identificação do aço 1050 (60 x)

Fonte: Próprio autor (2019)

A morfologia dos grãos de ferrita e das colônias de perlita caracteriza-se por ter o aspecto poligonal e no caso da perlita por se apresentar alongado (figura3).

De acordo com a dureza encontrada nos ensaios, permite concluir que o tratamento térmico utilizado foi o de normalização, aquecido numa temperatura entre 790 a 900 C° para um aço, cujo teor de carbono é de 0,50 % de acordo com a normas da ASTM e ABNT.

## 6 | CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir por meio da caracterização da microestrutura do aço 1050, que seus contornos de grão são bem delineados e homogêneos. Após o ataque químico foi perceptível uma nitidez, e um contraste satisfatório para análise dos resultados obtidos na amostra atacada com o reagente químico Nital 2 % e com ampliação 1000x; o que nos permitiu evidenciar as principais fases presentes na microestrutura caracterizando pela predominância com coloração branca e escuras característicos da ferrita e perlita proeutetóide (figura 3). Com isso, a microestrutura se formou acima do ponto eutetóide (0,76 % e 727 °C), isto é, seus teores se constituíram na faixa acima de 0,76 % e temperatura acima de 727 °C. Além disso, através do ensaio de dureza, percebemos que se trata de um aço duro e que, portanto, possui uma boa resistência a tração, propriedade fundamental em função do tipo de trabalho, a qual esta liga é submetida.

## REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, 7ª edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2012.

CALLISTER, Willan D.1940- **Ciências e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8ª edição -Rio de janeiro: LTC, 2012.

MORAES REGO LIMA FILHO, Helilton. **Análise de ataques químicos para revelação de microestruturas de soldas dissimilares de aços inoxidáveis Austeníticos e ferríticos.** Trabalho de conclusão de curso. Ceará- 2013.

FERNANDO PADILHA, Ângelo. **Materiais de Engenharia. microestrutura e propriedades.** Curitiba- PR: HEMUS: 1997

## EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM UMA INDÚSTRIA DE GALVANOPLASTIA NA CIDADE DE JUAZEIRO DO NORTE-CE

Data de aceite: 02/06/2020

### **Petronio Silva de Oliveira**

Superintendência Estadual de Meio Ambiente  
do Ceará Crato-CE

<http://lattes.cnpq.br/4384395439211194>

### **José Laécio de Moraes**

Universidade Regional do Cariri - URCA  
Crato-CE

<http://lattes.cnpq.br/9829351853867075>

### **Francisco Evanildo Simão da Silva**

Instituto Agropolos do Ceará  
Crato-CE

<http://lattes.cnpq.br/4050637854975937>

### **Francisco Thiciano Rodrigues de Assis**

Universidade Estadual da Paraíba

<http://lattes.cnpq.br/1885639784901243>

### **Edyeleen Mascarenhas de Lima**

Instituto Federal do Ceará Crato-CE

<http://lattes.cnpq.br/7638008422164535>

### **Anderson Lima dos Santos**

Superintendência Estadual de Meio Ambiente  
Juazeiro do Norte-CE

<http://lattes.cnpq.br/8925542924594037>

**RESUMO:** Os processos de eletrodeposição ou galvanoplastia geram grandes quantidades de efluentes líquidos, com

uma carga pesada de metais pesados e materiais dissolvidos suspensos. Esse fato faz com que esse efluente seja tratado de forma correta e eficiente para alcançar os níveis de concentração dos parâmetros exigidos pela legislação. O presente trabalho descreve uma forma de tratamento clássica mas de grande valia para o meio ambiente. Os parâmetros que são avaliados são (amônia, cádmio, cianeto, cromo total, cromo hexavalente, DQO, níquel, materiais Sedimentáveis, Óleos Vegetais, óleos Minerais, pH, sólidos em suspensão total, sulfato, sulfeto, temperatura, cobre, chumbo e zinco. Uma empresa na cidade de Juazeiro do Norte/CE foi objeto de estudo no presente trabalho. O empreendimento tem como atividade principal a fabricação e venda de semi-jóias como por exemplo brincos, anéis, alianças, correntes, pulseiras, etc. A água é um insumo de extrema importância na produção da empresa gerando em média 30 a 35m<sup>3</sup> de efluente. Para o tratamento dos efluentes gerados é utilizado o processo clássico, realizado por bateladas, que consiste em um tratamento via Oxi-Redução. Tendo como finalidade a redução dos metais pesados os quais são precipitados em forma de hidróxidos insolúveis e a oxidação do cianeto a cianato.

**PALAVRAS CHAVES:** Efluente líquido;

## EFFICIENCY OF EFFLUENT TREATMENT IN A GALVANOPLASTY INDUSTRY IN THE CITY OF JUAZEIRO DO NORTE-CE

**ABSTRACT:** The electrodeposition or electroplating processes generate large amount of wastewater, with a heavy load of heavy metals and dissolved materials suspended. This fact makes this effluent is treated properly and efficiently to achieve the levels of concentration of the parameters required by law. This paper describes a form of classical treatment but of great value to the environment. The parameters that are evaluated are (ammonia, cadmium, cyanide, total chromium, hexavalent chromium, COD, nickel, Sedimentable materials, Vegetable Oils, oils minerals, pH, solids in full suspension, sulfate, sulfite, temperature, copper, lead and zinc . A company in the city of Juazeiro / EC has been the object of study in this work. The project is primarily engaged in the manufacture and sale of semi-jewelry such as earrings, rings, wedding rings, chains, bracelets, etc. Water is an input of utmost importance in the company's production generating on average 30 to 35m<sup>3</sup> effluent. For the treatment of wastewater generated is used the classic process performed by batch, consisting of a treatment via Oxi-reduction. For purposes of reduction heavy metals which are precipitated in the form of insoluble hydroxides and oxidation of cyanide to cyanate.

**KEYWORDS:** Liquid effluente; Treatment; Electroplating.

### 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma demanda na cidade de Juazeiro do Norte por parte da população civil, bem como as instituições organizadas em compreender ou acreditar que os efluentes das indústrias de galvanoplastia de joias e semijoias estão sendo lançados no solo, corpos d'água e lençóis freáticos dentro dos padrões exigidos pelas normas técnicas.

Nos dias 18 e 22 de maio a Superintendência Estadual do Meio Ambiente (Semace), por meio da Diretoria de Fiscalização (Difis), fez a operação Metal Nobre, no município de Juazeiro do Norte, que durante a ação foram verificados 25 (vinte e cinco) empreendimentos que realizam o trabalho de “folheamento” em semijoias e bijuterias (SEMACE, 2015). Entretanto segundo SEBRAE(2007) afirmam que o ramo de folheados no município congrega 40 empresas formais e cerca de 250 informais, sendo desse universo 100 (cem) delas são indústrias.

Essas atividades podem acarretar sérios prejuízos ao meio ambiente e à saúde pública caso não cumpram as exigências de controle ambiental. Isso porque o banho químico das peças é considerado de alto potencial poluidor degradador. Vale ressaltar que o município se destaca nacionalmente como um dos polos na produção de semijoias e bijuterias, estando atrás apenas de Limeira/SP e Guaporé/RS (FERNANDES, 2005).

Outro ponto que vale ressaltar é a água que é um insumo bastante utilizado nas indústrias galvânicas, tais usos são: lavagens de peças por todo o processo, preparação das soluções eletrolíticas, limpeza de pisos e tubulações. Com essas finalidades as águas tornam-

se contaminadas por resíduos do processo industrial ou pelas perdas de energia térmica, originando assim os efluentes líquidos contaminados com os sais metálicos dissolvidos.

A indústria de galvanização é caracterizada pelo excessivo consumo de água e energia, pela geração de efluentes líquidos contendo metais pesados e emissões gasosas, oriundas das perdas por evaporação dos banhos aquecidos, além dos resíduos sólidos gerados no preparo dos materiais a serem galvanizados. Os efluentes líquidos gerados na indústria galvânica são provenientes das operações de limpeza de peças brutas, das soluções perdidas ou arrastadas durante o processo, do eventual descarte dos banhos, das águas de lavagem do piso e, principalmente, do descarte das águas de enxágue das peças retiradas dos banhos eletroquímicos. A elevada carga tóxica dos efluentes líquidos gerados no processo de galvanoplastia é composta, principalmente, por sais de cianeto e metais pesados como cobre, níquel e cromo, entre outros, que podem estar presentes nas formas solúvel e insolúvel (PACHECO, 2002).

O tratamento dos efluentes do processo de galvanização, normalmente, é realizado por processos físico-químicos em batelada, gerando uma grande quantidade de lodo galvânico, classificado como resíduo perigoso, de acordo com a NBR 10.004, da ABNT. (PACHECO, 2002). Segundo CPRH (2001), em se tratando de indústrias de tratamento de superfícies metálicas, parâmetros como metais pesados, DBO, DQO são os mais significativos e limitam o descarte dos efluentes líquidos, portanto, merecedores de um constante monitoramento.

A contaminação de ambientes aquáticos causada por metais pesados e efluentes com altos índices de cor e turbidez se tornou, nas últimas décadas, objetivo de interesse pelas autoridades responsáveis. Há uma forte demanda de tecnologias mais econômicas para a remoção desses poluentes. A remoção destes contaminantes é, conseqüentemente, uma prioridade na pesquisa e na exigência para o atendimento da legislação ambiental atual.

A poluição pelos efluentes líquidos industriais deve ser controlada inicialmente pela redução de perdas nos processos, incluindo a utilização de processos mais modernos, arranjo geral otimizado, redução do consumo de água incluindo as lavagens de equipamentos e pisos industriais, redução de perdas de produtos ou descarregamentos desses ou de matérias primas na rede coletora. A manutenção também é fundamental para a redução de perdas por vazamentos e desperdício de energia.

O tratamento dos efluentes que contêm metais pesados é frequentemente um problema econômico e/ou técnico por causa da composição e da severidade crescente de padrões que regulam o descarte (PAGNANELLI, 2002). Diversos métodos estão sendo adotados para o tratamento de efluentes contendo metais pesados, entre eles, cita-se precipitação química, troca iônica (resinas), osmose inversa e adsorção (carvão ativado e biossorção).

Entre os processos convencionais de remoção de metais de superfície, aproximadamente 75 % das indústrias de tratamento de superfície utilizam o processo de precipitação química, pois se apresenta como um método relativamente simples e econômico, com o inconveniente de gerar grandes quantidades de lodo (CPRH, 2001).

Os processos de tratamento a serem adotados, as suas formas construtivas e os materiais a serem empregados são considerados a partir dos seguintes fatores: a legislação

ambiental regional; o clima; a cultura local; os custos de investimento; os custos operacionais; a quantidade e a qualidade do lodo gerado na estação de tratamento de efluentes industriais; a qualidade do efluente tratado; a segurança operacional relativa aos vazamentos de produtos químicos utilizados ou dos efluentes; explosões; geração de odor; a interação com a vizinhança; confiabilidade para atendimento à legislação ambiental; possibilidade de reuso dos efluentes tratados (GIORDANO, 1999).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

O presente trabalho visa analisar a forma de tratamento de efluentes gerados a partir de uma indústria de galvanoplastia no município de Juazeiro do Norte. CE.

### 1.1.2 1.1.3 *Objetivos Específicos*

Dentre os principais, destacamos: Verificar a relação produção versus geração de efluentes; adequar o efluente de acordo com a legislação vigente; analisar todos os elementos da estação de tratamento de efluentes; otimizar processos que possam melhorar a qualidade ambiental; e promover o desenvolvimento sustentável.

## 1.2 Justificativa

Existem inúmeras indústrias dessa natureza na cidade de Juazeiro do Norte, apenas em uma operação foram encontrados 25(vinte e cinco) empreendimentos, sendo que oito foram notificados pelos fiscais ambientais da Superintendência Estadual de Meio Ambiente - SEMACE para regularizarem sua situação junto ao licenciamento da Superintendência, já que essa é a responsável por licenciar esse tipo de atividade em decorrência do alto potencial poluidor degradador definido na resolução do COEMA 07, de 2019. Uma das empresas foi embargada, pois está destinando seus efluentes sem tratamento diretamente em um aparelho sanitário, ou seja, lançando “in natura” no solo, contaminando os corpos d’água e o lençol freático (SEMACE, 2020).

O procedimento empregado para o tratamento de efluentes confere o atendimento à resolução CONAMA 357, bem como as Resoluções do COEMA 02, de 2017, mostrando ser eficiente e aplicável ao processo da empresa estudada, podendo ser aplicado também a outras empresas que possuem o processo de geração de efluentes de galvanoplastia. As empresas no município de Juazeiro do Norte estão cada vez mais se adequando as legislações ambientais.

O cumprimento com as obrigações do tratamento dos efluentes são exigidas cada vez mais pela Companhia de Água e Esgoto - CAGECE, pela Superintendência Estadual de Meio Ambiente - SEMACE e pela Autarquia Municipal de Meio Ambiente - AMAJU. Esses órgãos estão cada vez mais se adequando as exigências legais em âmbito nacional e internacional que automaticamente perpassam aos empresários o comprometimento com a importância

do tratamento de efluente, destacando a preservação do meio ambiente.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Costa (1988) é adotado o método clássico onde é realizado por bateladas, que consiste em um tratamento via Oxirredução onde ocorrerá a redução dos metais pesados os quais são precipitados em forma de hidróxidos insolúveis utilizando hidróxido de sódio (soda cáustica) ou cal hidratada (hidróxido de cálcio) e a oxidação do cianeto a cianeto utilizando o hipoclorito de sódio. Com esse rigoroso tratamento assim se o efluente estará nos limites toleráveis para os descartes na rede pública coletora de esgoto ou até mesmo em corpos hídricos A precipitação dos metais pesados ocorre em faixas de PH correspondentes como, (Cobre – 10,0 – Zinco – 9,0 – Cádmiio 10,0 –Níquel – 10,0).

De acordo com PASQUALINI (2004) a decantação dos precipitados em forma de hidróxido insolúveis ocorre por meio de agentes coagulantes e floculantes. Após todo o tratamento de oxidação do cianeto e redução dos metais pesados o PH do efluente é neutralizado por meio de ácido nítrico ou clorídrico e descartado.

### Tratamento de Cromo hexavalente

O princípio básico do tratamento de efluentes físico-químicos (metais) é transformar o metal dissolvido na forma iônica em outro produto deste mesmo metal que não seja solúvel em água. Estes produtos são os hidróxidos metálicos. Para formação destes hidróxidos basta que adicionemos aos efluentes íons hidroxilas (provenientes da cal e da soda cáustica) Todos os metais com exceção ao CROMO HEXAVALENTE ( $Cr^{6+}$ ), reagem com facilidade em contato com as hidroxilas ( $OH^-$ ). O metal CROMO é a única exceção, pois somente reage com o  $OH^-$  se estiver na forma TRIVALENTE ( $Cr^{3+}$ ). Portanto, como uma primeira etapa no tratamento do cromo, devemos reduzi-lo de ( $Cr^{6+}$ ) para ( $Cr^{3+}$ ) (PACHECO, 2012).

Os reagentes conhecidos como agentes redutores são utilizados dependendo do meio em que reagem. Quando o meio é ácido, se utiliza metabissulfito de sódio e se o meio é neutro ou alcalino o agente usado é o hidrossulfito de sódio.

### Tratamento de Cianeto

O Caso do cianeto é diferente, pois o cianeto não é um cátion, mas sim um ânion ( $CN^-$ ) que tem a capacidade de “complexar” o metal a ele associado. Estando o metal na forma de complexo (cianeto de cobre, de zinco, de níquel, etc.), o íon hidroxila não consegue reagir para formar o hidróxido e assim precipitar o metal.

A única forma de conseguirmos fazer a hidroxila reagir com o metal e forma hidróxido é destruir cianeto para libertar o complexo, e para destruir o cianeto temos que oxidá-lo a cianeto ( $CNO^-$ ), utilizando como reagente oxidante o hipoclorito de sódio ( $NaClO$ ) ou hipoclorito de cálcio ( $Ca(ClO)_2$ ).

## Neutralização

A neutralização é responsável pela formação de hidróxidos metálicos, pela adição de hidroxilas provenientes de soluções alcalinas tais como: soda cáustica, cal, carbonatos, etc. Dependendo da carga sólida do efluente (quantidade de metais presentes, não deve ser encarada apenas como a adição de um agente alcalino, mas sim como um auxiliar de clarificação (floculação) e filtração de lodo).

## Clarificação

Para iniciar o tratamento de um efluente industrial, devem ser removidos os sólidos suspensos, óleos e graxas, para depois remover as impurezas dissolvidas através do processo físico-químico que se resume em transforma-los, através de reações químicas, em compostos solúveis.

A clarificação é o processo através do qual se removem as impurezas presentes na forma de sólidos suspensos, incluindo a remoção da turbidez e da cor, e que compreende os processos de coagulação, floculação e decantação.

## Coagulação

Essas impurezas apresentam, na maior parte dos casos, carga superficial negativa, impedindo que as mesmas se aproximem uma das outras.

Para que essas impurezas possam ser removidas, é preciso altear suas características físico-químicas através da adição de sais alumínio (sulfato de alumínio ou policloreto de alumínio) e ferro (Cloreto de ferro), que são os mais efetivos para formar coágulos, do qual resultam dois fenômenos. O primeiro essencialmente químico consiste nas reações de coagulação com água e na formação de espécie hidrolisadas com carga positiva. Depende da concentração do metal e do pH final da mistura. O Segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte de espécies hidrolisadas, para que haja contato com as impurezas presentes na água.

## Floculação

A floculação é o processo que agrega os coágulos em suspensão, tornando-os maiores e de maior peso, acelerando a velocidade de decantação. Isso ocorre com a adição de polieletrólitos, que são polímeros a base de poli(acrilamidas de cadeias moleculares muito extensas, que adquirem cargas eletrostáticas na sua diluição em água, pela atuação das forças de atrito. Existem vários tipos de polieletrólitos: Catiônicos (adquirem cargas positivas), aniônicos (adquirem cargas negativas) e não iônicos (adquirem ambas as cargas, cada uma em uma extremidade da molécula), servindo cada um para um tipo de efluente. No caso de efluentes contendo metais (cátions:+), utilizaremos um polímero aniônico (de carga oposta:-)

Benefícios e vantagens na utilização dos polímeros

- Aumenta a eficiência da ETE
- A turbidez da água tratada é visivelmente melhorada
- Redução no volume de produtos químicos, conseqüentemente a redução no custo do

tratamento.

- Melhor compactação de lodo

## Decantação

A decantação é o processo de precipitação dos flocos pela ação da gravidade, separando-se o sedimento da água tratada. O tempo de decantação deve ser de 24 horas para que o processo tenha eficiência.

Portanto, em efluente industrial após tratamento físico-químico formará duas fases: uma líquida, que é a água tratada, conhecida como sobrenadante, e a segunda fase, formada por sólidos, conhecida como lodo galvânico. O efluente antes de ser descartado deve ser verificado o pH, temperatura e materiais sedimentáveis. O lodo deve ser separado acondicionado e armazenado, depois destinado a reciclagem ou co-processamento.

## 3 | METODOLOGIA

O município de Juazeiro do Norte, Ceará criado em 1911, está localizado nas coordenadas  $7^{\circ} 12' 47''$  (S) e  $39^{\circ} 18' 55''$ ; (WGr), na Região Metropolitana do Ceará, no Sul do estado, ficando a uma distância de 396 km da capital, Fortaleza (Fig.1). Tendo como limites as cidades de Caririçu, Missão Velha, Barbalha e Crato.

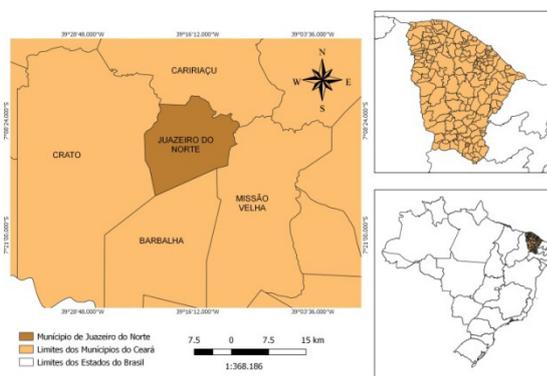


Figura 1: Mapa de Localização da cidade de Juazeiro do Norte/CE.

Fonte: Autores, 2019. Elaboração: *Software Qgis*.

O estudo foi realizado em uma empresa na cidade de Juazeiro do Norte, CE. O empreendimento se destaca como uma das principais no ramo de fabricação de semi-jóias como, por exemplo, brincos, anéis, alianças, correntes, pulseiras, etc., Aplicando camadas de cobre, níquel, cromo, prata e ouro nas peças. Dessa atividade faz com que a empresa gere 30 a 35m<sup>3</sup> de efluente diário. A água da empresa é proveniente de um poço profundo devidamente autorizado para utilização. O tratamento do efluente é realizado por batelada. Todas as águas de lavagem, arrastes, descartes de soluções do processo produtivo são destinadas a um tanque receptor de 30m<sup>3</sup>. A estação de tratamento de efluentes contem seis tanques cada um com capacidade de 5m<sup>3</sup>. Existe um operador devidamente capacitado para a operação da estação, tais operações são o bombeamento do efluente do tanque receptor

até os tanques de tratamento, preparo das soluções químicas para realizar o tratamento, descarte, acondicionamento do lodo galvânico gerado. É realizado o controle de pH, materiais sedimentáveis, temperatura e vazão.

É realizada análise do efluente tratado por um laboratório especializado onde são analisados os seguintes parâmetros (amônia, cádmio, cianeto, cromo total, cromo hexavalente, DQO, níquel, materiais Sedimentáveis, Óleos Vegetais, óleos Minerais, pH, sólidos em suspensão total, sulfato, sulfeto, temperatura, cobre, chumbo e zinco), de acordo com os valores de referência exigida pela legislação vigente.

A empresa tem uma produção diária de 65kg de peças processadas na galvânica. É gerado cerca de 400kg de lodo galvânico, o qual é utilizado sacos com tecido apropriado para separar o efluente do lodo formado. Esse lodo é acondicionado em tambores de poli etileno tampados, identificados e armazenados em local seco e arejado com piso adequado. Junta-se em torno de 18000kg e envia para empresa especializada na reciclagem e descontaminação.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a adequação da empresa é preciso uma série de esforços para manterem as Estações de tratamento funcionando adequadamente. É necessário um mini laboratório, a estrutura da estação de tratamento, mão de obra qualificada, envio do lodo galvânico da ETE para uma empresa de reciclagem especializada, além de assessoria técnica.

Ensaio físico-químico ANALITO	RESULTADO	MÉTODO	LEGISLAÇÃO	UNIDADE
Amônia	< 0,1	EPA 350.1, APHA 44500D-NH3	5,0 mg N/L	mg/L
Cádmio	<0,1	S M W W 2 2 n d -1500B-Cd	0,2 mg Cd/L	mg/L
Cianeto	<0,1	S M W W 2 2 n d -2500B-Ci	0,2 mg CN/L	mg/L
Cromo total	0,6	S M W W 2 2 n d -5500A-Cr	5,0 mg Cr/L	mg/L
Cromo hexavalente	0,2	S M W W 2 2 n d -5500B-Cr	0,5 mg Cr/L	mg/L
DQO	4,0	Refluxação Fechada-Modificado- Método B	200,00	mg/L
Níquel	1,0	S M W W 2 2 n d -5400-Ni	2,0 mg Ni/L	mg/L
Materiais Sedimentáveis	<0,1	Cone Imhof	Até 1,0 ml/l.h	mg/L.h

Óleos Minerais	4,0	Extração de Soxhlet	20,0 mg/L	mg/L
Óleos Vegetais	0,0	Extração de Soxhlet	50,0 mg/L	mg/L
pH	7,71	Eletrométrico	5,0 a 9,0	pH
Sólidos em Suspensão Total	13,0	Gravimétrico	Até 100,0	mg /L
Sulfato	10	S M W W 2 2 n d - -4500E-SO4	500,0 mg SO42-/L	mg/L
Sulfeto	<0,1	SM4500S2-D	1,0 mg S/L	mg/L
Temperatura	29°C	Filamento de Mercúrio	<b>&lt; 40 °C</b>	°C
Cobre	< 0,1	S M W W 2 2 n d - -3500B-Cu	<b>1,0 mg Cu/L</b>	mg/L
Chumbo	< 0,1	S M W W 2 2 n d - -4800B-Pb	<b>0,5 mg Pb/L</b>	mg/L
Zinco	1,2	S M W W 2 2 n d - -4800B-Zn	<b>5,0 mg Zn/L</b>	mg /L

Tabela 1: Análise do efluente tratado.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As **Tabelas 1 e 2** mostram dados de análise do efluente tratado da indústria de semijóias e valores da norma padrão permitidos. No geral, percebe-se que para todos os elementos analisados para este efluentes apresentaram estar abaixo dos valores permitidos na norma, evidenciando que este efluente foi bem tratado. Contudo é bom destacar alguns fatores para melhor visualização.

ANALITO	RESULTADO	MÉTODO	VMP	UNIDADE
Coliformes Termotolerantes	32	SMWW 22nd- 9222 D	5000 UFC/100 ml	UFC/ 100 mL
Coliformes Totais	50	SMWW 22nd- -9222B	-	UFC/ 100 mL

Tabela 2: Ensaio Microbiológicos Analíticos

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como se trata de uma indústria de semijóias, é comum encontrar quantidades consideráveis de metais pesados em seus efluentes. Observando a **Tabela 1**, conclui-se que os métodos empregados para o tratamento destes efluentes foram bem eficientes, visto que para esta classe, a quantidade apresentada após os tratamentos foi consideravelmente baixa. Isto pode ser evidenciado pela quantidade apresentado de alguns metais. Cádmiu,

Chumbo, Cobre apresentaram valores menores que 0,1 mg/L, enquanto o Cromo Total foi 0,6 mg/L. Comparando com os valores das normas da Legislação (COEMA 02, de 2017), os testes para quantidade desses metais pesados foram satisfatórios, pois apresentam valores bem abaixo do máximo permitido, principalmente se tratando do Cromo, cujo valor máximo permitido é de 5 mg/L. Estes valores evidenciam que o método para remoção de MP do efluente tratado foram bem eficientes.

Quanto as características físico-químicas, destaca-se a temperatura e o pH. O tratamento do efluente também foi bem eficiente para tais características, visto que apresentaram valores dentro da faixa permitida e das condições ambientais. Para temperatura, 29 °C se aproxima do valor do ambiente, e o pH de 7,1 está localizado na zona neutra.

Para os elementos tóxicos, apresentaram resultados bastantes satisfatórios, com destaque para amônia. O máximo permitido pela legislação é de 5 mg/L, e o resultado apresentado pelo efluente tratado foi menor que 0,1 mg/L. Apesar de menor proporção, destaca-se também o cianeto, que foi removido com certa eficiência e ficou bem abaixo do máximo permitido, que é de 0,2 mg/L.

A DQO, que mede o consumo de oxigênio devido a presença de matéria orgânica no efluente tratado, foi bem satisfatório, visto que o resultado apresentado foi de 4 mg/L, e o máximo permitido é de 200 mg/L. Assim, os métodos empregados para remoção do material orgânico foram de extrema eficiência.

Quanto à presença de oleaginosas, não houve ou foi totalmente removido os óleos vegetais do efluente pós-tratamento, enquanto óleos minerais foram bem reduzidos, para uma faixa de 4 mg/L, abaixo do máximo que é de 20 mg/L.

O mesmo padrão também se observou para os materiais sedimentáveis e os sólidos em suspensão total, onde o tratamento do respectivo efluente reduziu consideravelmente a quantidade destes materiais e sólidos para bem abaixo do máximo permitido pela legislação.

Para o os coliformes termotolerante e totais o tratamento também tem eficiência, deixando esses analitos dentro do padrão estabelecido pela legislação ambiental.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A água é um dos insumos bastante utilizado para os banhos eletrolíticos, gerando grande volume de efluentes. Para isso as empresa devem tratar tais efluentes, para que o mesmo possa ser lançado em rede coletora de saneamento básico ou até mesmo em algum corpo hídrico, nos padrões exigidos em leis. Mediante resultados obtidos podem ser feitas algumas considerações. As indústrias de semijóias instalada no município de Juazeiro do Norte utilizam o processo de precipitação química para o tratamento do efluente líquido gerado, toda via esse processo é relativamente barato, mas há o inconveniente de gerar grande volume de lodo galvânico, sendo este um lodo químico que é classificado como resíduo classe I, isso faz que as empresas tenha a responsabilidade de dispor a destinação a empresas devidamente capacitadas seja para co-processamento ou reciclagem através da recuperação dos metais encontrado. Sendo assim o presente trabalho mostra o aumento no

volume de trabalho e o crescimento da atividade com criação de empregos direto e indiretos, mostrando a importância da responsabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS

COEMA. Conselho Estadual de Meio Ambiente. **DISPÕE SOBRE PADRÕES E CONDIÇÕES PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS GERADOS POR FONTES POLUIDORAS NO AMBITO DO ESTADO DO CEARÁ.** Resolução nº 02 de 02 de fevereiro de 2017.

COEMA. Conselho Estadual de Meio Ambiente. **DISPÕE SOBRE AS DEFINIÇÕES DAS ATIVIDADES DE IMPACTO LOCAL E REGIONAL.** Resolução nº 07 de 12 de setembro de 2019.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **DISPÕE SOBRE PADRÕES E CONDIÇÕES PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS GERADOS POR FONTES POLUIDORAS NO TERRITÓRIO NACIONAL.** Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.

COSTA, C. A. **Sorção de Íons Cobre, Níquel e Zinco com o Rejeito do Beneficiamento de Carvões e Outros Materiais Alternativos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 1998. 64 p. Tese (Mestrado).

CPRH, COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE. **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização: Tipologia Galvanoplastia.** Recife: CPRH/GTZ. 2001.

PACHECO, C. E. M. **Projeto piloto de prevenção à poluição em indústrias de bijuterias no município de Limeira: casos de sucesso.** (2002) CETESB, São Paulo, 32 p.. Disponível em: <http://www.cetesb.br>. Acesso em: 24 agosto 2010.

PAGNANELLI, F.; ESPOSITO, A.; VEGLIÒ, F. **Multimetallic modelling for biosorption of binary systems.** *Water Research*, v. 36, p. 4095-4105. 2002.

PASQUALINI, A. **Estudo de Caso Aplicado a Galvanoplastia.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2004. Tese (Mestrado).

SEMACE, **Semace realiza operação Metal Nobre para coibir danos ambientais na produção de bijuterias.** Disponível em: <http://www.semace.ce.gov.br/2015/06/semace-realiza-operacao-metal-nobre-para-coibir-danos-ambientais-durante-a-producao-de-bijuterias/> Acesso em: 02 de fevereiro 2020.

FERNANDES, L.S. C., 2005. **Arranjo produtivo de jóias e folheados de Juazeiro do Norte:** Uma proposta que vale ouro. Dissertação de Mestrado, UFC, p. 13-24.

## ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO LUCAIA, SALVADOR-BA

Data de aceite: 02/06/2020

### **José Orlando Oliveira Moura Júnior**

Graduando de engenharia mecânica na Faculdade Ruy Barbosa Wyden; E-mail: orlandojuniorcia@hotmail.com

### **Nicole Caroline B. Santos Xavier**

Graduando em Engenharia Química na Faculdade Ruy Barbosa Wyden; E-mail: nicolexavier01@hotmail.com

### **Thayna Santana de Lima**

Graduando de engenharia mecânica na Faculdade Ruy Barbosa Wyden; E-mail: limasthayna@gmail.com

### **Alexandre Boleira Lopo**

Professor de Ciências do Ambiente na Faculdade Ruy Barbosa Wyden; E-mail:

**RESUMO: Introdução:** O Rio Lucaia, ou Rio Vermelho tem sua nascente no dique do Tororó, passando pela Vasco da Gama a rua Lucaia e a avenida Juracy Magalhães até desaguar no largo da Mariquita, no bairro do Rio Vermelho, os moradores das áreas cercadas pelo rio ficaram com dúvidas a respeito da qualidade das águas do Rio Lucaia. **Metodologia:** Foi pesquisado por dados no INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos), com a intenção

de comparar dados dos últimos anos. **Resultados e discussões:** Os níveis de qualidade da água constatados no Rio Lucaia fazem com que o próprio apresente-se em péssimas condições, constatando-se por meio dos dados pesquisados. **Conclusão:** Após os testes realizados na água percebe-se que o corpo hídrico apresenta estado de eutrofização crítica e péssima qualidade das águas superficiais. O IQA (Índice de Qualidade da Água) do rio encontra-se com a média 11.35 (classificação péssima) pelo dia, durante 3 anos consecutivos comprovando a decadência do Rio Lucaia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rio Lucaia, INEMA, IQA

### **INTRODUÇÃO:**

O rio Lucaia, ou Rio Vermelho, nasce no Dique do Tororó e passa pela avenida Vasco da Gama, Rua Lucaia e a avenida Juracy Magalhães até desaguar no largo da Mariquita, no bairro do Rio Vermelho. Sua bacia hidrográfica engloba os bairros de Brotas, Itaigara, Santa Cruz, Rio Vermelho, Federação, Ondina, Garcia e Tororó do modo total ou parcial. Logo surgiu a dúvida de que o rio não estaria sob as normas técnicas e

estaria poluído por falta de saneamento ou presença de esgotos clandestinos.

## **OBJETIVO GERAL:**

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar a qualidade ambiental do Rio Lucaia.

## **OBJETIVO ESPECIFICO:**

Mensurar o nível de degradação do rio urbano e sua origem

Avaliar a situação biofísico química das águas superficiais do Rio Lucaia.

Apontar soluções e alternativas para o assunto em questão.

## **METODOLOGIA**

Em primeiro momento foi feita a visita no local e foram feitos registros fotográficos. Na segunda fase houve uma pesquisa de artigos referentes ao assunto, a análise dos relatórios baseados em dados oficiais do INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos) e a análise da situação biofísico químico do rio com as normas estabelecidas pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Apresenta-se na figura 1 a foz do Rio Lucaia do Rio Vermelho, onde se observa a água com coloração escura.

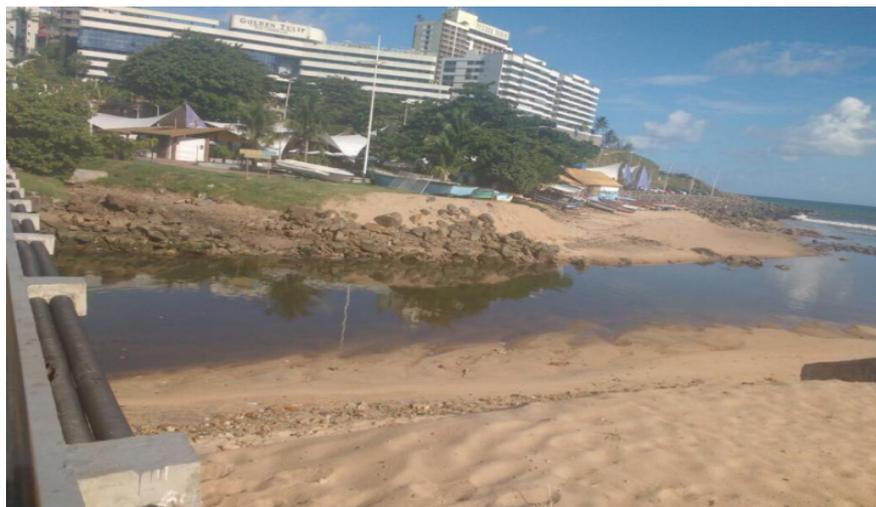


Figura 1: Foz do Rio Lucaia no bairro do Rio Vermelho, em 17 de março de 2018

Fonte: Própria



Figura 2: Imagem da localização da área de estudo e a distribuição dos pontos de coleta

Fonte: <http://www.proceedings.blucher.com.br>

Na **Tabela 1** observa-se que os dados estão relativamente de acordo com o que é o padrão, porém nota-se altíssimos níveis de turbidez, o que explica a coloração escura da água. Para o gráfico foram considerados o Potencial de hidrogênio (Ph), Salinidade e Turbidez.

Estação	Horário	Ph	Turbidez	Salinidade
Ponto 1 manhã	09:21	8,68	232	3,87
Ponto 2 manhã	09:38	8,39	106	1,74
Ponto 3 manhã	09:52	8,73	205	3,33
Ponto 1 tarde	14:58	8,89	202	3,87
Ponto 2 tarde	15:12	8,52	112	1,59
Ponto 3 tarde	15:19	8,74	159	2,37

TABELA 1

Fonte: XIV ENEEAmb/ Marques, Oliveira, Souza, Melo, Wicks, Moreira

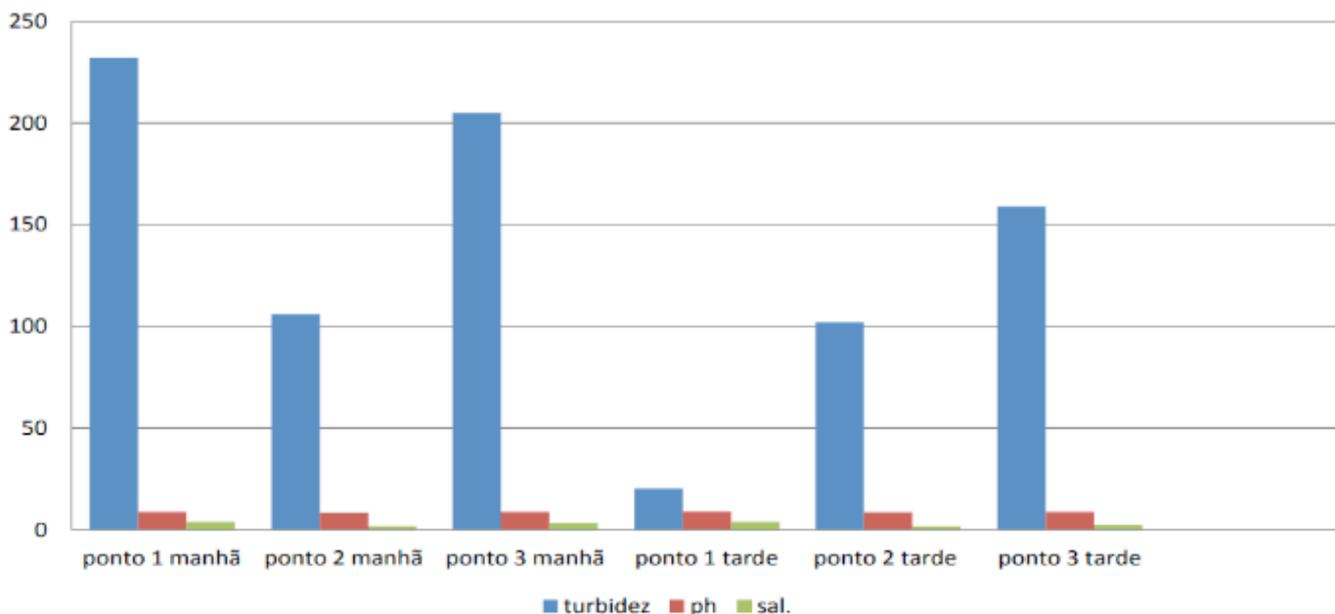


Gráfico 1. Parâmetro Fisicoquímico

Fonte: Própria

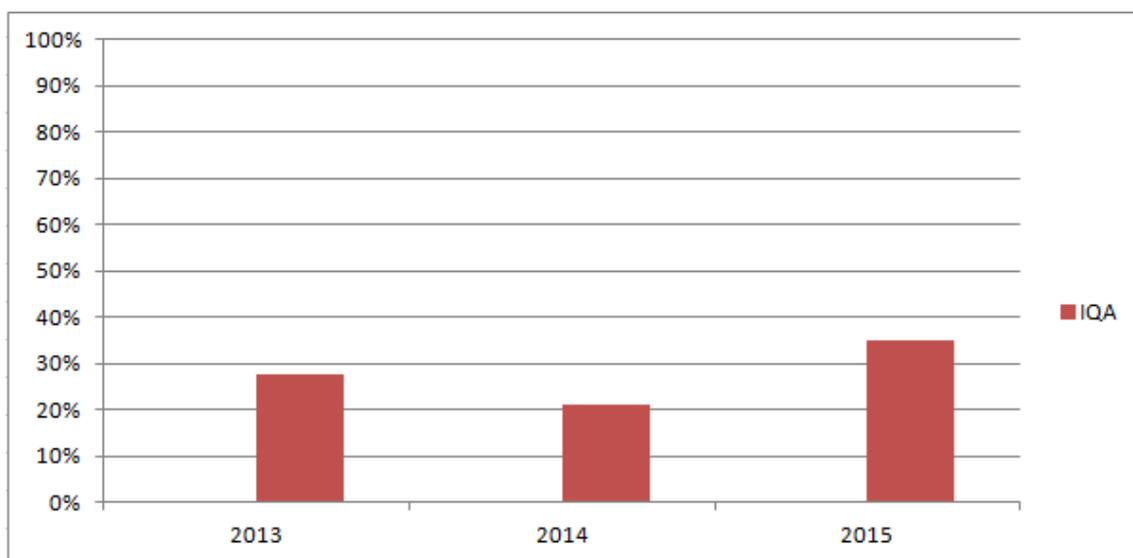
Turnos	IQA Calculado	Parâmetro	Classificação
Matutino	10,57	$0 < IQA \leq 19$	Péssima
Vespertino	12,50	$0 < IQA \leq 19$	Péssima

A Tabela 2 trata do cálculo de IQA no turno da manhã e da tarde, onde o resultado é bem alarmante sobre a qualidade da água.

Fonte: XIV ENEEAmb/ Marques, Oliveira, Souza, Melo, Wicks, Moreira

A qualidade da água foi avaliada através de indicadores, segundo a Resolução CONAMA nº357/05, calculando o IET (Índice do Estado Trófico) e também o IQA (Índice de Qualidade da Água). No primeiro ponto, foi detectada uma taxa mais alta de salinidade com 3,87% e um maior valor de sólidos totais com 54,8 g/l, causando um aumento da turbidez de 232 NTU da água neste ponto.

Em segundo momento tem as informações do RELATÓRIO TÉCNICO Nº 028/16 imitado pelo o INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos). É apresentado um gráfico que evidencia a degradação do rio entres os anos de 2013 e 2015 e o índice de qualidade da água de acordo com a média anual de 0% a 100%, sendo 100% considerado ótimo. IQA: 27,6%, 21%, 35%, respectivamente.



**Gráfico 2. IQA DE ACORDO COM A MÉDIA ANUAL**

Fonte: Própria

Com base, o rio em análise apresenta coloração, odor, turbidez, salinização e Ph indesejáveis, podendo estar contaminado por esgotos clandestinos e lixos jogados no rio. Visitas ao local foram feitas e foi constatado o mal cheiro da água, as amostras foram coletadas no turno da manhã, devido maré baixa apresentando IQA de 10,57 (considerado péssimo) e no turno da tarde com a maré alta apresentando IQA de 12,50 (também considerado péssimo).

## CONCLUSÃO

Diante das considerações supracitadas é nítido que o Rio Lucaia está em péssimo estado ambiental. Após os testes realizados na água percebe-se que o corpo hídrico apresenta estado de eutrofização crítica e péssima qualidade das águas superficiais. Durante 3 anos consecutivos a qualidade da água do rio permaneceu, com IQA médio de 11,35 (péssimo). Inclusive com o PH (potencial de hidrogênio) que se manteve praticamente constante em 8,65 e Turbidez elevadíssima.

Para solucionar essa problemática, é de extrema importância o monitoramento e o possível tratamento dos efluentes domésticos e comerciais ao longo do baixo curso do Rio Lucaia para a padronização estabelecido pelo CONAMA nº357, ou a implantação do projeto de jardins/ilhas flutuantes que é capaz de oxigenar a água, como foi aplicado em Filipinas, com as plantas é possível voltar ao equilíbrio desejado.

## REFERÊNCIAS

TOPÁZIO, E. Relatório Técnico nº 028/16. CONAMA. Salvador- BA, 2016

MARQUES, I. Avaliação do nível de degradação das águas superficiais do rio Lucaia. XIV ENEEAmb. Brasília, 2016



Data de aceite: 02/06/2020  
Data de submissão: 24/03/2020

\* Este artigo foi apresentado no GT 02 - Cidades Latino-americanas no novo milênio, como Resultado de investigação realizada, Avanço de investigação e Desenvolvimento de metodologias e produção / análise de dados no XXIX Congresso Latino-americano de Sociologia – ALAS Chile 2013. Na ocasião o autor era doutorando pelo PPGCSO da UFJF e bolsista CAPES/REUNI. A convergência de estudos entre o presente trabalho, a diferença na adoção de técnicas de pesquisa e as linhas de trabalho desenvolvidas pelo Observatório das Metrôpoles instituição em que o autor realiza atualmente estágio pós-doutoral, em que é bolsista FAPERJ, o encorajou a publicar o artigo.

### Franklin Soldati

Pós-doutorando pela UENF / INCT /  
Observatório das Metrôpoles / UFRJ  
Rio de Janeiro – RJ / Campos dos Goytacazes  
– RJ

Link para curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7838284687374706>

**RESUMO:** A oferta de infraestrutura urbana no Brasil tem sido avaliada, por parte da literatura neoinstitucionalista, pela ótica da descentralização e re/centralização, abordando, principalmente, qual dos entes federativos tem maior ou

menor capacidade de êxito na adoção de políticas públicas. Isto deixa de fora aspectos centrais do arcabouço institucional brasileiro. Trata-se como aspecto marginal, ou problemático, a variável “eleitorado” merece maior atenção. No artigo, defende-se a construção de um índice ideal de avaliação de desempenho das cidades, referente à infraestrutura urbana, que seja capaz de incrementar investimentos ou mesmo de descaracterizar a titulação de cidades, no caso de estas não se comprometerem com o critério avaliado. O modelo informacional e o conceito de auditório retórico são utilizados numa reavaliação dos legislativos municipais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Infraestrutura urbana, legislativo, federalismo, eleitorado.

### QUALITIES OF URBAN

**ABSTRACT:** The offer of urban infrastructure in Brazil has been evaluated by the neoinstitutionalist literature from the perspective of decentralization and re/centralization, addressing, mainly, which of the federal entities has greater or lesser capacity for success in the adoption of public policies. This leaves out central aspects of the Brazilian institutional framework. Treated as marginal, or problematic, the variable “electorate” deserves greater attention. In the article it is defended the construction of an ideal index of evaluation of performance of cities, referring to the urban infrastructure, that is able to increase investments or even to mischaracterize the titration of cities, those that do not try to be them in fact. The

informational model and the concept of the rhetorical auditorium are used to revalue municipal legislative.

**KEYWORDS:** Urban infrastructure, legislative, federalism, electorate, voters.

## 1 | INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste artigo é propor a defesa da construção de um índice ideal de avaliação do desempenho das cidades, no que concerne à infraestrutura urbana, via ranqueamento. Tal índice poderia, não somente, incrementar investimentos em determinadas regiões, como também descaracterizar a titulação de municípios e, principalmente, de cidades, aquelas que não se esforçarem em cumprir suas ambições de as serem de fato. Nas ciências sociais, métodos multidimensionais têm a vantagem de poderem aproximar, de modo contundente, os centros e suas periferias, já que possibilitam uma discussão ampliada da qualidade e da direção de investimentos, além de permitirem a analistas externos avaliar apenas pelos resultados, sem esmiuçar os trâmites e os movimentos poliárquicos, mas identificar aspectos, oposições e a capacidade de aproximação entre a infraestrutura e a superestrutura urbanas. Isto respalda a proposta que o estabelecimento de índices multidimensionais pode estimular investimentos regionais, cedendo maior autonomia, na gestão de políticas públicas, aos municípios, dadas as características de lugar, de modo que os pré-requisitos para investimentos em infraestrutura básica seriam refinados a ponto de implicar, como já implicam, questões federativas. Sabe-se que o modelo federativo brasileiro, de três níveis hierárquicos autônomos e equipolentes apresenta-se como novidade e, por isto mesmo, tem sido encarado como obstáculo. Daí os estudos sobre competências, descentralização e *accountability*. Mas é fato que a literatura neoinstitucionalista tem avaliado a oferta de infraestrutura urbana no Brasil ao privilegiar a ótica da descentralização e re/centralização, em que aborda, principalmente, qual dos entes federativos tem maior ou menor capacidade de êxito na adoção de políticas públicas, o que deixa de fora aspectos centrais do arcabouço institucional brasileiro. Tratadas como aspectos marginais, problemáticos ou laterais, as variáveis “legislativo” e, principalmente, “eleitorado” merecem maior atenção. Por isto, ao contrário das vozes que entendem, como solução aos problemas brasileiros, menos participação e menos política, neste artigo, defende-se mais participação política, pela simples convicção de que o maior especialista da vida cotidiana é o próprio cidadão. De forma que a descaracterização de municípios, ou parte deles, tenderá a um *accountability* radical, pois caso algumas comunidades cheguem ao extremo da descaracterização e suas elites sejam consideradas incapazes, a superestrutura urbana deve ser entregue aos próprios cidadãos. Surge assim, a possibilidade de uma maior participação da sociedade nos plenários municipais, o que poderia fazer o movimento de aproximação do individual e do coletivo e contribuir para atualizar as questões, republicana e federativa, nacionais.

Este artigo inicia com a significância estatística obtida entre o comparecimento eleitoral e a infraestrutura urbana de um estudo precedente do autor (SOLDATI, 2009), que inclui a identificação de um fenômeno urbano produzido pelas disputas poliárquicas. A seguir, algumas

técnicas estatísticas, alternativas, são propostas como forma de pensar uma idealidade das cidades brasileiras, no tocante à oferta de infraestrutura urbana. Dado o nosso modelo federativo, discute-se em seguida, a questão da competência, os problemas de geração própria de recursos, de transferência pelos entes centrais, a capacidade administrativa atual dos municípios em atender às demandas da população, bem como as possibilidades de intervenção popular nos centros decisórios das políticas públicas. Mais adiante, a dicotomia desespero / esperança é proposta como ponte na associação entre o tamanho das cidades e participação. Na sequência, percebe-se a possibilidade de especialização do modelo informacional nos parlamentos, adequado às Câmaras Municipais. Por último, a busca por aproximação entre as Ágoras gregas e os atuais legislativos municipais.

## 2 | COMPARECIMENTO ELEITORAL E INFRAESTRUTURA URBANA

A significância estatística entre as taxas municipais de comparecimento eleitoral<sup>1</sup> e um fenômeno composto por 22 variáveis socioeconômicas obtidas junto ao Atlas de Desenvolvimento Humano do Brasil, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD-ONU), Fundação João Pinheiro (FJP-MG) e pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA-MG) (2003), com base no censo 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000)<sup>2</sup>

---

1 O período se referiu às eleições para executivo no Brasil, nas esferas federal, estadual e municipal, nos anos de 2006-2008. A eleição para o executivo municipal, em 2006, não obteve associação estatística na dissertação de mestrado, com relação ao “Comparecimento” e “Abstenção” eleitoral para o 1º eixo, “movimento de reafirmação urbana”, mas apenas para a “Abstenção” com relação ao segundo eixo “preocupação social urbana”, que já autorizava o atual exercício. Contudo, durante a redação da tese de doutorado, os dados foram revistos e a associação, do segundo eixo com o “Comparecimento”, também pôde ser observada (cf. SOLDATI, 2016). De fato, houve inclusive uma ampliação do período. Nas eleições municipais de 1996 e 2000, foram verificadas associações estatísticas com os dois eixos ortogonais.

2 Toda a explicação do fenômeno obtido com a utilização da técnica da Análise Fatorial está disponível em Soldati (2009). As análises da significância estatística, bem como o diagrama de 126 regressões, estão disponíveis em Soldati (2011) e, posteriormente, com período ampliado em Soldati (2016).

Variáveis ora selecionadas	Componentes	
	1º	2º
Esperança de vida ao nascer, 2000	0,597	
Renda per Capita, 2000	0,847	0,417
Intensidade da indigência, 2000	0,593	
Intensidade da pobreza, 2000		-0,757
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com água encanada, 2000	0,476	0,825
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com banheiro e água encanada, 2000	0,453	0,837
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com energia elétrica e geladeira, 2000	0,576	0,678
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com energia elétrica e TV , 2000	0,345	0,831
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com energia elétrica, 2000		0,852
Percentual de pessoas que vivem em domicílios urbanos com serviço de coleta de lixo, 2000	0,374	0,841
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com densidade acima de 2 pessoas por dormitório, 2000		-0,881
Percentual de pessoas que vivem em domicílios e terrenos próprios e quitados, 2000		-0,578
Percentual de pessoas que vivem em domicílios subnormais, 2000	0,313	
Percentual de pessoas que vivem em domicílios com pelo menos 3 dos bens anteriores, 2000	0,756	0,516
Média de anos de estudo das pessoas de 25 anos ou mais de idade, 2000	0,912	
Percentual de pessoas de 25 anos ou mais de idade com doze anos ou mais de estudo, 2000	0,817	0,404
Percentual de pessoas de 25 anos ou mais analfabetas, 2000	-0,897	
Percentual de pessoas de 25 anos ou mais com menos de quatro anos de estudo, 2000	-0,908	-0,309
Percentual de pessoas de 18 a 24 anos que frequentam o curso superior, 2000	0,784	0,441
Taxa bruta de frequência à escola, 2000	0,539	
Taxa de alfabetização, 2000	0,889	
Número de médicos residentes por mil habitantes, 2000	0,750	0,349

Quadro 01

Fonte: elaboração própria (SOLDATI, 2009) a partir de variáveis obtidas junto ao Atlas do

Desenvolvimento humano do Brasil, 2000 (PNUD-ONU, Fundação João Pinheiro, IPEA, 2003).

Acabou por encorajar a solicitação de políticas públicas, uma vez que o estudo se posta ao lado de outros, como os de Lima Junior (1990), Alkmim dos Reis (1992), Carvalho (2003), Carmo, Cordeiro e Rocha (2006) e Santos (2007), que demonstram a tendência do eleitorado em comparecer às eleições para o executivo, caso tivesse acesso a serviços de infraestrutura urbana ou caso visse possibilidades de manutenção ou melhora de suas condições de vida. Isto reitera uma das principais teses da Ciência Política: associação entre variáveis socioeconômicas e participação política. O estudo avança com a perspectiva de que o comparecimento eleitoral brasileiro já pode ser considerado como avaliação eleitoral. De um processo estanque de votação, no Brasil a cada dois ou quatro anos, para reflexões a médio e longo prazo, em que o dia da eleição será apenas o final de um longo processo de negociação consigo mesmo, com os pares, familiares, vizinhos, comunidade e com a grande carga de informação a que é submetido diariamente. Algo como o consenso retórico em Magalhães (2000).

O estudo acima também comprovou, através da técnica da Análise Fatorial e do estabelecimento de um *ranking*, o grau de oferta de serviços de infraestrutura urbana pelas cidades (SOLDATI, 2009). Observou-se que algumas localidades se preocupavam mais com o atendimento de necessidades coletivas, em detrimento de outras mais individuais, enquanto outras localidades perseguiam maior especialização individual, em detrimento

de necessidades mais coletivas. Pode-se depreender então que o resultado das disputas poliárquicas terminam por imprimir rumos às cidades brasileiras e tendem a determinar o estado de nossa infraestrutura urbana. A situação se complica pela questão federativa, já que a lógica que alimenta tais disputas produtivas entre os grupos de poder nas cidades é apenas reprodução da lógica do modelo nacional.

Apesar da pluralidade inerente ao conceito de poliarquia, a magnitude das diferenças do poder de influência dos grupos é notada, por isto, a dinâmica democrática instila abertura dos centros de decisão, através de processos de descentralização, rumo a uma maior participação. Para Souza (2002), o fato de a descentralização ter sido tomada pela constituinte reforça a visão que o processo foi mais político e não simplesmente administrativo, principalmente pelo fato da decisão daqueles congressistas ter apenas refletido as pressões da sociedade civil e de outros atores subnacionais, demonstrando a pluralidade de interesses conflitantes presentes em nossa sociedade que incluíram o recente histórico do regime militar.

### 3 | MÉTODOS MULTIDIMENSIONAIS<sup>3</sup>

Algumas técnicas<sup>4</sup> podem ser elencadas como propícias ao objetivo proposto, que é o de buscar um índice<sup>5</sup> ideal de desempenho das cidades brasileiras<sup>6</sup>, tendo como ponto de partida fundamental, a escolha das variáveis componentes. Esta talvez seja a tarefa mais complexa e árdua na definição da idealidade proposta, ou mesmo na busca de idealidades outras. Depois, com as variáveis selecionadas, pensadas e apropriadas, se for o caso, pode-se passar à utilização pelas técnicas. Na Análise Fatorial, ficará a dependência das cargas, mas a grande vantagem é sua capacidade de reunir variáveis multicolineares. Num outro espectro é possível trabalhar com a técnica de Pareto. Como impedimento apenas a questão do “ótimo paretiano” e suas implicações quanto aos recursos disponíveis. Outra técnica capaz de avaliar, com profundidade, a questão da infraestrutura urbana é a chamada “espinha-de-peixe”, em que os principais serviços estariam dispostos em eixos específicos e ali dissecados, quanto às problemáticas associadas por grupos especializados. Uma última, talvez, seria o procedimento de clusterização. Sabe-se que tal procedimento foi precedido pela clusterização conceitual até alcançar os avançados processos de clusterização estatística. A pretensão talvez seja resgatar aquela ideia circulante nos meios políticos de que procurar a “vocalização” de determinadas cidades significaria agrupar aquelas que possuem maiores

---

3 Ao iniciar o estágio pós-doutoral na UENF / Observatório das Metrópoles / INCT / UFRJ, este autor teve acesso à técnica desenvolvida por Bourdieu e retrabalhada por Ribeiro e Preteceille (1999). A Análise de Correspondência Binária aliada a Classificação Hierárquica Ascendente são técnicas refinadas, de agrupamento e ordenação.

4 Anotações de aula, Pós-graduação *Lato Sensu* em Métodos Estatísticos Computacionais- ICE/UFJF e consultoria obtida junto ao Prof. Neimar da Silva Fernandes (FERNANDES, 2013).

5 Santos Junior (2001), do Observatório, já apresentava uma série de índices que buscavam, de certa forma, qualificar a vida do cidadão metropolitano do Rio de Janeiro.

6 A idealidade do índice aqui pensada passa longe daquela idealidade das cidades de Santo Agostinho (cf. BARBOZA FILHO, 2000) e ou da *Utopia*, de Thomas Morus (MIGUEL, 2007). O índice ideal almejado supõe as características do lugar, de sua historicidade, do “bom viver”, mas implica vencer as razões que podem desqualificar a denominação de cidade de qualquer centro urbano.

características industriais, administrativas, comerciais, de serviço, militares, etc. A dificuldade atual é que, devido a complexificação das sociedades, via cidades, não é mais possível isolar, ou conceitualizar, toda uma cidade, ou região, sob um rótulo. Contudo, é determinante a importância do estado e mesmo do mercado, na vida das pessoas e isto fica patente em cidades pequenas. De qualquer forma, como já se faz com as análises de regressão mais elaboradas, a utilização de quaisquer técnicas acima remete à contrafactualidades (MAGALHÃES, 1997).

#### 4 | QUESTÕES FEDERATIVAS

Após a ilustração das técnicas que permitem apontar as possibilidades de nossos municípios em oferecer infraestrutura urbana aos seus habitantes, passa-se a discutir as questões federativas. Em artigo relacionado a este tópico, e ao de políticas sociais, Arretche (2001) afirma que a grande inovação da constituição da Filadélfia, segundo Riker (*Apud idem*, 2001), teria sido a fórmula associativa que criou um governo central autônomo e independente dos estados que o constituíram, em que a presidência e o corpo legislativo passaram a ser escolhidas diretamente pelo voto popular, distinguindo-o daquela dependência aos estados-membros caracterizado nas confederações. Entendeu-se que nas origens promotoras da emergência federativa estaria a barganha das partes e assuntos internos, na qual a ameaça ou as oportunidades de expansão, as defesas militares e, até mesmo a diplomacia teriam um papel congregador.

Contudo, outros estudos questionaram esta metodologia e, a partir dos anos 1980, alterou-se a preocupação nas pesquisas sobre federalismo, partindo do enfoque das especificidades de cada modelo federativo, para a pesquisa do peso deste sistema sobre a autoridade dos governos centrais, cuja ênfase recai na capacidade destes de alterar o *status quo*. Assim, ao considerar Lijphart e Tsebelis, a autora adota o argumento de Pierson e Leibfried (*Apud idem ibidem*, 2001) de que sistemas federativos acabam restringindo mudanças nas políticas, uma vez que as garantias institucionais a todos os membros tendem a produzir decisões num mínimo denominador-comum.

O conceito de federalismo surge, portanto, como uma descrição genérica que esconde uma gama diferenciada de arranjos institucionais. O fato de governos centrais poderem intervir em áreas de políticas sobrepujando outros níveis de governo propicia o estímulo da inovação em políticas públicas pelo governo central, mas, em contrapartida, provoca conflitos de interesse, uma vez que outros níveis tenderão a tentar o mesmo, antes que o outro o faça, assim, elevam-se os custos de programas que, tornam a coordenação e a administração

---

8 Um estudo que aborda as questões inter e intrafederativas, além de cogitar as possibilidades de estabelecimento, ou não, de pactos entre as partes é o de Condé (2008). O autor avaliou as possibilidades de pactos como alternativas nacionais para ampliar uma “Europa social”, para alguns países, como também a inexistência desta tal dimensão social, em outros, mas observa que, em alguns, os pactos seriam uma impossibilidade. Nestes, visualiza apenas caminhos adaptativos, tais como: liberalização britânica, imposição pelo alto ou confronto francês. Além da intenção de demonstrar uma modernidade política, tal pesquisa avalia o esforço de adequação e as implicações do processo, que foi posto em movimento.

algo difícil (ARRETCHE, 2001). Fica claro que mudanças de regras em sistemas federativos são complicadas, pois envolverão inúmeras instâncias<sup>8</sup>.

Segundo Tomio (2005), somente na carta de 1988, os municípios brasileiros são elevados, de fato, ao *status* de ente federativo. A partir daí, o país torna-se a única federação contemporânea a contar com três entes federativos. A descentralização política da nova carta veio acompanhada de um rearranjo fiscal e de competências tributárias o que terminou por gerar o mais expressivo processo de fragmentação de municípios de Estados Nacionais, com a criação de 1.385 novos municípios no Brasil, cerca de ¼ dos atuais, sendo interrompida pela Emenda Constitucional nº 15, de 1996. De acordo com o autor, três estados se notabilizaram neste processo: Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Tocantins.

A onda emancipacionista pôde ser entendida como decorrência do regime político por uma “restrição orçamentária não rígida” (SHIKIDA, 1998 *Apud* TOMIO, 2005), em que as transferências intergovernamentais, Fundo de Participação dos Municípios (FPM), por exemplo, incentivariam os atores, em regimes democráticos a decidir por emancipações, a fim de favorecer localidades, nas quais se aumentassem o volume de recursos. Mas o mesmo também ocorreu<sup>9</sup> sob a alegação de que a transferência de recursos não é condição *sine qua non* para a manutenção de unidades locais, mas principalmente baseado em estudos que demonstraram, por referendos, expectativas negativas quanto às possibilidades de fusão de condados e municipalidades, já que a população entendeu que os serviços públicos têm maior capacidade de provimento em regiões mais fragmentadas administrativamente (MARANDO, 1973 *Apud* TOMIO, 2005).

Criar um novo município no Brasil, para o autor, diferentemente do que acontece em outros países, é criar um novo ente federativo, independentemente de ter menos de mil ou ter milhões de habitantes, pois isto carrega a mão no impacto político, já que não se conciliam os interesses autonomistas locais com a racionalidade generalizante das altas esferas governamentais, daí a querela da criação de municípios retornar à geração de custos difusos e benefícios concentrados naquela perspectiva apontada por Howllet (1995) e Carvalho (2003). Tomio (2005) informa que, para a população local, a fragmentação municipal redundava em maior disponibilidade de recursos sem a obrigação de aumento na carga de impostos e, se, as unidades a serem fragmentadas envolverem apenas municípios pequenos o benefício é amplo, pois, eleitores e lideranças serão amplamente beneficiados e ninguém se postará contra.

Diante da dúvida de criar ou não um município, os habitantes de pequenas cidades do interior se justificam pela maior oferta de empregos e com as possibilidades de melhorar a oferta de serviços públicos, caso isto, de fato, aconteça. A questão que o autor coloca é que criar inúmeros municípios, concomitantemente, é gerar um problema orçamentário, tanto para o governo como um todo quanto para os outros municípios que não se fragmentaram, mas que dependem de transferências constitucionais. Por esta razão, defende o aprimoramento da lógica da distribuição do FPM, para além de populacional, tornar-se *per capita* e, com

---

<sup>9</sup> Isto é considerado o mais importante para o autor do presente artigo.

isso, acabar com os impactos negativos sentidos pelos municípios que não se dividem e restringir estímulos a fragmentações espúrias.

## 5 | DESCENTRALIZAÇÃO DE POLÍTICAS SOCIAIS E PARTICIPAÇÃO POPULAR

Falar sobre mecanismos de distribuição e problemas do processo de descentralização que ocorrem no Brasil, após 1988, implica avaliar competências entre os entes federativos. Além disto, abordar distribuição de receitas / riquezas reclama pensar as formas de participação, fiscalização e empoderamento da sociedade como formas de garantir acesso, manutenção ou melhora de serviços sociais ofertados.

A composição da cesta tributária aparece aqui como o primeiro passo para esta intrincada explicação já que, de algum modo, determina de onde vem e como serão distribuídos os principais impostos nacionais. De acordo com Arretche (2004), desde 1891, época de sua fundação, a federação brasileira escolheu adotar um regime de separação de fontes tributárias, em que diferentes impostos têm diferentes competências arrecadadoras. Segundo a autora, atualmente, a arrecadação é concentrada, uma vez que cinco dos principais impostos representam mais de 70% da arrecadação e onde quatro deles são da competência da União. Contudo, desde 1946, a desigual capacidade de arrecadação pelos entes subnacionais, é superada pelas transferências constitucionais. Os chamados ciclos de centralização (Reforma Tributária de 1965-68) e descentralização (Constituições de 1946 e 1988) nada mais seriam do que a aplicação diferenciada de alíquotas que parcelam aqueles impostos de repartição obrigatória aos outros entes federados (*Idem*, 2004).

Um grande impedimento, indireto, mas relevante, ocorreu quando os constituintes de 1988 optaram pelas competências concorrentes para a maioria das políticas sociais no Brasil, no que concerne ao processo de descentralização brasileiro. Portanto, mesmo ao autorizar os entes a implementarem os programas não os obrigou a tal (*Idem ibidem*, 2004). Já Rolnik e Klink (2011) entenderam a adoção de uma descentralização “tutelada” nas áreas de infraestrutura urbana, habitação e saneamento, ao contrário do sistema de hierarquização de competências, casos da saúde e da educação<sup>10</sup>.

Estudos reforçam as evidências empíricas que a grande maioria dos municípios brasileiros não tem condição de autossustentação, por não possuir atividade econômica substancial e que é caracterizada pela extrema pobreza de suas populações (SOUZA, 2002). Assim, mesmo o Fundo de Participação dos Estados e do Distrito Federal (FPE) e o FPM não são considerados suficientes para pequenos municípios vencerem a situação de extrema pobreza, uma vez que pouco alteraram a grande heterogeneidade social das

---

10 Nesse trabalho, os autores apresentam dados interessantes sobre a preocupante situação dos domicílios no Brasil. A construção de um *proxie* possibilitou identificar a adequação ou inadequação de municípios brasileiros no que tange à infraestrutura urbana básica, representadas em cinco variáveis fundamentais. O estudo abrangeu os censos de 1990 e 2000 e a PNAD de 2006 e 2008 e concluiu que, em 1991, somente 23% dos domicílios eram considerados “adequados”. Os dados sofreram alteração em 2000 com aumento de 10 pontos percentuais e a projeção para 2008 ficou em torno de 45,63%.

idades brasileiras, além do fato de a grande maioria ser incapaz de conseguir gerar receitas próprias.

A falta de garantias quanto aos modelos de autonomia municipal, que os torne responsáveis e eficientes e mais comprometidos com as necessidades dos cidadãos, é um aspecto enfatizado em Arretche (2003). Segundo a autora, autonomia local não significa eficiência e pode produzir déficits fiscais sistemáticos, sendo assim, a descentralização nem sempre é mais positiva, já que a autonomia local não implica em responsabilidade fiscal nem previne quanto às possibilidades de captura pelos interesses privados. Entretanto, lembra que a mudança de paradigma foi de grande vulto e cita o exemplo da saúde que deixou um modelo contributivo e centralizado, nos moldes da “cidadania regulada”<sup>11</sup> de Wanderley Guilherme dos Santos (*Apud idem*, 2003), rumo a um modelo em que o direito legal de acesso é universal e onde a prestação de serviços é hierarquizada e descentralizada. Deste modo, avaliza os ganhos do SUS.

Para a autora (*Idem ibidem*, 2003), são os incentivos que acabam dosando o comportamento responsável dos governos, tanto locais quanto nacionais. E são as instituições, desenhos das políticas públicas, regras e normas sociais, as responsáveis pela conformação do comportamento dos atores políticos.

Quem avalia objetivamente os incentivos, como sanção e recompensa, na adoção e aplicação das políticas sociais, é Souza (2004). Dados indicam que, de 1991 a 2000, a adesão à municipalização da saúde alcançou 98,96% dos municípios. O relevante é identificar como ocorreu esta amplificação na adesão ao modelo. As vantagens foram os recursos adicionais oferecidos aos municípios e, conseqüentemente, 66% dos municípios começaram a recebê-los após a adesão. Para Arretche (2003), o governo federal contribuiu ainda mais neste processo já que diminuiu as exigências quanto aos resultados das políticas de saúde, priorizando o processo de descentralização. Mesmo assim, com medidas meramente administrativas, a municipalização neste setor criou parâmetros, reduziu a incerteza e o grau de politização e partidarização no uso dos recursos (SOUZA, 2004). Na educação, por outro lado, os caminhos para a municipalização foram diferentes. Como faltou dinheiro novo, a distribuição foi feita pelo Fundo de Manutenção e Desenvolvimento da Educação Fundamental e Valorização do Magistério (FUNDEF), atual Fundo de Desenvolvimento da Educação Fundamental e Básica (FUNDEB). A verba do fundo acompanhou(a) a matrícula, quer dizer, o recurso acompanhou(a) o aluno. Portanto, a adesão dos governos locais à municipalização da educação ocorreu numa velocidade e proporção diferente daquele ocorrido na área da saúde. Aqui o incentivo foi de sanção e não de recompensa. Um fato fundamental para o sucesso de ambas as políticas foi que além do desenho institucional, os dois ministérios responsáveis por tais políticas públicas foram ocupados por pessoas próximas ao presidente da república. Mas a autora vê com preocupação o que considera um contra-ataque do governo federal, uma espécie de re / centralização orquestrada desde os anos 90, a qual se baseia na criação de impostos não partilhados com os outros entes

11 Conferir as observações sobre o conceito de “Cidadania Regulada” do Professor Fábio Wanderley Reis no artigo, “O tabelão e a Lupa” (REIS, 1991).

federativos (*Idem*, 2002).

De outra forma, a contrapartida esperada aos processos de descentralização é a maior abertura à participação da população, diretamente, ou através da sociedade civil. Por isto é que o processo de descentralização gerou grandes expectativas quanto às possibilidades de empoderamento (*Idem ibidem*, 2002). Souza (2004) diferencia alguns conceitos de participação como empoderamento e o de participação como voz. Para organismos multilaterais, a voz das pessoas locais, pobres principalmente, pode ser ouvida através de reformas via políticas nacionais, facilitando o acesso a organizações não-governamentais, e outras associações civis. Na participação como *empowerment*, a ideia é que grupos antes excluídos, ao tomarem consciência da sua exclusão, tornem-se ativistas no sentido de modificar sua condição política e social, contudo, há descrença no formato da participação como empoderamento.

Algumas chances que os interessados, população e sociedade civil, têm de influir no processo de formulação e implementação das políticas de saúde são avaliadas em Arretche (2003). A primeira, diz respeito ao eleitorado, que tem a chance periódica de escolher as propostas dos candidatos ou mesmo punir más administrações. A segunda chance trata da natureza das relações entre os diversos níveis de governo envolvidos nas estruturas institucionais que envolvem as políticas. No caso do SUS, as leis 8080 e 8142/90, além da NOB/93, funcionam como uma constituição, em que o governo federal regula as decisões locais, já que controla o financiamento, além dos mecanismos de coordenação intergovernamental. Em contrapartida, estados e municípios têm direitos de participação através das Comissões Intersectoriais, federal e estadual.

Uma terceira chance foi identificada por Rolnik e Klink (2011). Para os autores, existem arestas na formulação das políticas de habitação e saneamento básico, com relação ao conselho gestor do Fundo de Garantia e Tempo de Serviço (FGTS) já que tal conselho é composto apenas por empresários e empregados, deixando de lado estados e municípios, o que, por si só, descaracteriza o modelo federativo. Porém, tais autores não abordam a necessidade de inclusão de outros segmentos da sociedade civil, ou mesmo da população.

Quanto ao papel dos conselhos municipais, Arretche (2003) percebe uma dificuldade prática em definir o que é um bom “conselho de saúde”, em instituir indicadores confiáveis para serem utilizados comparativamente e que a pleora de conselhos atuais é obstáculo para uma avaliação do real impacto dos conselhos no desempenho das políticas de saúde. O fato é que governos locais podem ter a chance de manipulá-los, mas não de eliminá-los. Mas é verdade que, até o momento, a efetividade dos conselheiros sobre os governos depende da disposição dos próprios governos em serem controlados.

## 6 | DESESPERO / ESPERANÇA E PARTICIPAÇÃO

Enumerar variáveis que compõem os centros urbanos impõe avaliar a colinearidade entre elas. Daí é possível pensar na dicotomia desespero / esperança, pela associação entre riqueza e pobreza e entre riqueza e indignação.

Estudo paralelo em Soldati (2009) (2011) verificou a existência de associação estatística entre índices de riqueza / pobreza e entre riqueza / indignância.

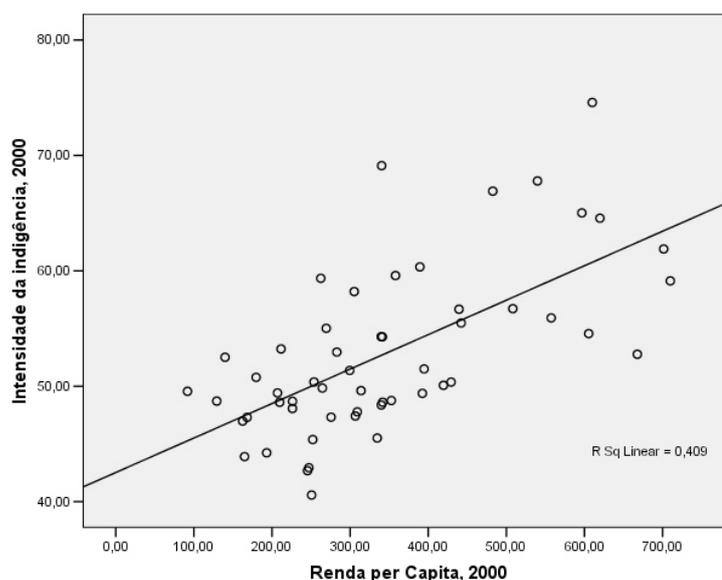
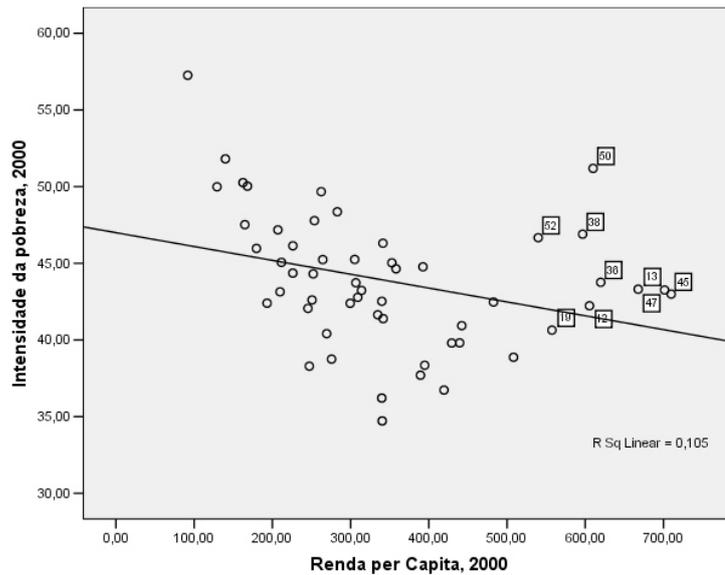


Gráfico 01

Fonte: elaboração própria (SOLDATI, 2009) a partir de variáveis obtidas junto ao Atlas do desenvolvimento humano do Brasil, 2000 (PNUD-ONU, Fundação João Pinheiro, IPEA, 2003).

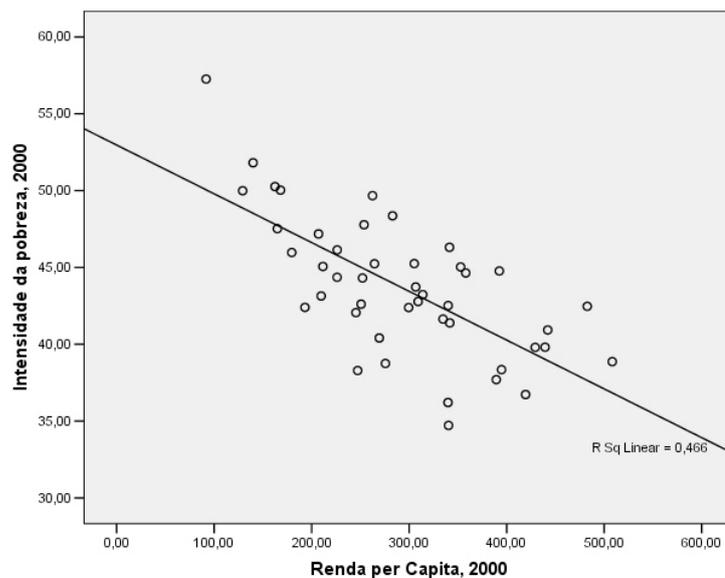
Como resultado desse estudo, há a proposição de que a esperança, de fato, figure entre as razões de maior participação comunitária por parte dos cidadãos. Ou seja, “à medida que a renda sobe, diminui a pobreza e surge a indignância. Fica subentendido que cidades médias superam a pobreza e que as cidades grandes, mesmo que a pobreza já não seja o maior dos problemas, não conseguem conter o problema da indignância”<sup>12</sup> (SOLDATI, 2011).

12 Note-se que o cruzamento da “renda *per capita*” com a “intensidade da pobreza” o  $r^2$  é baixo, o que indica, provavelmente, uma relação não-linear. Mas, ao se retirar cidades como Brasília, Vitória, Belo Horizonte, Curitiba, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Florianópolis, São Paulo e Ribeirão Preto, ou seja, as metrópoles, tem-se uma interpolatriz com um  $r^2$  de 0,466, que já pode ser considerado algo razoável numa equação de correlação (cf. SOLDATI, 2009). Foram avaliadas 54 cidades brasileiras. Todas as capitais e, ao menos, uma cidade do interior, com população acima de 100.000 habitantes. Necessário destacar que “renda *per capita*” alta é uma característica, ao menos brasileira, de cidades maiores. Em Soldati (2011), propõe-se uma sinonímia entre indignância e desespero, oriunda de algum tipo de violência psicológica, moral ou física. Em contraste, a pobreza pode ser entendida apenas como a falta de recursos suficientes para a manutenção individual e familiar. Assim, defendeu-se que laços de família e amizade são mais fortes e mais eficazes em cidades de menor porte, onde também a vizinhança, as comunidades e suas associações se empenham em repartir esperanças e experiências com os indivíduos que acabam por integrar esta faixa da população. Já nos grandes centros, a individualidade chega a tal termo que qualquer ameaça deixa o indivíduo vulnerável. Uma noção de desespero que chamou a atenção do autor é aquela proposta em Kierkegaard.



Gráficos 02

Fonte: elaboração própria (SOLDATI, 2009) a partir de variáveis obtidas junto ao Atlas do desenvolvimento humano do Brasil, 2000 (PNUD-ONU, Fundação João Pinheiro, IPEA, 2003).



Gráficos 03

Fonte: elaboração própria (SOLDATI, 2009) a partir de variáveis obtidas junto ao Atlas do desenvolvimento humano do Brasil, 2000 (PNUD-ONU, Fundação João Pinheiro, IPEA, 2003).

## 7 | LEGISLATIVO MUNICIPAL, ARGUMENTAÇÃO, DELIBERAÇÃO E REPÚBLICA

Como adiantado, a literatura neoinstitucionalista tem dado pouca importância ao legislativo, no tocante à formulação de políticas sociais. Uma possibilidade de revalorização das casas legislativas surge com a adoção do modelo informacional numa forma estendida.

Quem entende o parlamento como um órgão colegiado e deliberativo é Rocha (2010).

Segundo a autora, o modelo informacional de organização destas casas apresenta contatos com o tema da deliberação. Porém, a maior dificuldade para se abordar este tema seria a distinção entre negociação e barganha da deliberação em si, pois mesmo que conceitualmente as fronteiras sejam mais claras, na prática a coisa sempre se complica (ELSTER *Apud* ROCHA, 2010).

Acredita-se que se consolidou, ao longo dos tempos, uma forma de organização legislativa, baseada no pluralismo, que reitera o papel dos representantes como defensores de grupos de interesses (GARDNER, 2005 *Apud* ROCHA, 2010), em que o congresso privilegia as questões democráticas e representativas em detrimento da deliberação. Mas o fundamental é que, em razão da organização prática dessas casas, acabou-se gerando hierarquias pautadas na divisão desigual de recursos entre líderes e liderados, mantendo os representantes iguais no tocante ao voto, mas desiguais no tocante ao acesso às informações. Mas é fato que, em ambos os modelos de estudos legislativos, distributivista com os comitês e partidário com as comissões, a deliberação fica de fora e quem toma seu lugar são a barganha e o voto. A autora entende que os comitês e as comissões poderiam ser apropriados para o melhor funcionamento das casas já que a complexificação da elaboração e implantação de políticas públicas acaba por orientar legisladores a atribuírem maior valor à troca de informações nas tomadas de decisão.

De modo que a deliberação pode contribuir para o aperfeiçoamento da representação política e que o modelo informacional de organização legislativa pode revalidar a argumentação, o debate e a discussão no processo legislativo, numa clara distinção dos processos de barganha e negociação (*Idem*, 2010).

## 8 | CONCLUSÃO

Os mecanismos de re/centralização, motivo de preocupação em um dos estudos aqui avaliados, podem ser entendidos como tentativas de aproximação dos objetivos individuais aos coletivos já que garantem recursos, não comprometidos, com a função de redistribuição de renda, vide os recentes programas do Governo Federal, como o Minha Casa Minha Vida, Bolsa-Família, Mais Médicos, Ciência sem Fronteiras etc. Ao que parece esses e outros fatores garantiram redistribuição de renda à maioria da população e por isto mesmo foram capazes de superar os custos do fracasso<sup>13</sup>. Não à toa, já há alguns anos, nota-se, junto à população em geral, um aumento da dignidade, respeito aos pares e aos cidadãos, ou seja, maior inclusão social e, por que não dizer, política.

Por isto, insiste-se na defesa de que a criação de municípios no Brasil pode ser avaliada como tentativa de se angariar distribuição indireta de riquezas, tanto pelas elites locais quanto pela população, não somente pelo acesso a recursos e ou ofertas de emprego, mas também pela maior oferta de serviços públicos. Tal prática pode ser entendida como um direito republicano, uma vez que ao pertencer a uma unidade, concorda-se com suas

---

<sup>13</sup> Conferir o conceito de “custo do fracasso” em Santos (2007).

obrigações, mas também com seus direitos. Contudo, ao propor a si mesmas os encargos de uma municipalidade as lideranças ficam obrigadas a reunir meios e alternativas para o atendimento a seus concidadãos. De qualquer forma, fica estabelecido um conflito entre a república e a federação.

Reclamar políticas públicas surge como uma necessidade, já que a distância verificada entre uma e outra região, ou município, resgata o desafio republicano de obrigação, de dever, mas também de fruição, de acesso aos bens produzidos pela sociedade. Mas como superar as diferenças de *status* entre as cidades, na oferta de serviços de infraestrutura urbana, diferenças essas acumuladas por séculos em diferentes momentos históricos e de estilos de governo? Entender nossa sociedade como um modelo poliárquico ajuda a estabelecer parâmetros de análise que sustentem a proposta deste artigo. Santos (2007), na esteira de Dahl, afirma que as insatisfações poliárquicas serão as responsáveis pela produção de conflitos produtivos, capazes de gerar aumento no bem-estar da população. Algumas cidades demonstram que conseguem oferecer vida digna aos cidadãos, mesmo com refinada estratificação social, outras não conseguem promover desenvolvimento econômico e social a altura de seus habitantes. Contudo, a procura do ideal republicano deve incluir, para todos, a possibilidade de participação continuada, ativa, cívica. Assim, municípios, cidades ou regiões municipais que não conseguirem manter níveis satisfatórios de qualidade de vida, devem ser descaracterizados. O conceito de urbano é claro, pois é preciso haver acesso a bens e serviços e se tais não estão disponíveis, não devem ser considerados centros urbanos. A ideia é seguir os mecanismos de sanção e recompensa já utilizados nos processos de descentralização de saúde e educação e aprofundar as possibilidades de participação dos cidadãos.

Com relação aos legislativos, podemos dizer que muito se discute sobre o papel dos atuais parlamentos, nas modernas democracias e do papel das coligações partidárias e seus resultados (KRAUSE, DANTAS, MIGUEL, 2010) em nossa democracia. O fato é que não se atualizaram as *Ágoras* gregas. Veja-se a função das Câmaras Municipais. Os vereadores são responsáveis pelo estabelecimento de leis e pela aprovação do orçamento. Na Grécia, grosso modo, os cidadãos, sorteados, consultavam seus pares e ao Senado, decidindo o destino das cidades, já nas modernas democracias os cidadãos ficam de fora.

Defende-se aqui, que uma das formas de atualizar as *Ágoras* seria reintroduzir os cidadãos nos auditórios dos plenários. Miguel (2000) apresenta inúmeras propostas de atualização democrática com base nas loterias, Callenbach e Phillips, Fishkin, Barber e Burnheim (*Apud idem*, 2000), em que os representantes são escolhidos através do sorteio. Mas, de fato, tais proposições seriam uma radicalização do modo representativo em operação em nossos parlamentos. Entretanto se, ao contrário, não os representantes dos grupos de poder, das elites partidárias, mas os representantes da população em geral, fossem assim eleitos, sorteados, para o auditório das Câmaras Municipais, poderíamos aumentar a visibilidade das ações, tanto do executivo quanto do legislativo, fugindo das amarras da jaula de ferro de Michels, bem como da burocratização weberiana, rumo àquela ideia de poliarquia levada a sério (AVRITZER, 2012). Assim, na proposta de especialização dos

parlamentos pelo modelo informacional de Rocha (2010), a questão deliberativa, no quesito argumentação, ficaria a cargo dos representantes eleitos, representantes poliárquicos, mas o auditório, ao contrário do franco acesso, seria composto pelos sorteados numa loteria radical entre toda a população do município, os cidadãos, nos moldes da argumentação retórica apresentada em Magalhães (2000). Estes novos mandatários comporiam o auditório que, através do voto, sim e não, aprovariam, reprovavam ou impediriam, não apenas o processo legislativo, mas também as peças orçamentárias que compõem os orçamentos anuais dos municípios brasileiros, completando a deliberação do processo argumentativo em curso nas reuniões dos plenários. Desta forma, talvez seja abolida a problemática dos vícios de origem bem como os excessos de articulação de gabinetes. De qualquer forma, ficam as dúvidas quanto aos reais efeitos de tais alterações geopolíticas, uma vez que aquelas variáveis psicossociais (REIS, CASTRO, 2001) continuarão presentes em todo o espectro populacional e a influência dos grupos *idem*.

Fica claro que a preocupação da literatura dedicada ao tema é no quesito apropriação adequada dos recursos, pelos grupos de poder, mas a defesa que aqui se faz presente não é menos política, mas ao contrário, justifica que haja mais política, mais participação da população, a fim de reforçar os ideais republicanos, em que os beneficiários de qualquer política social devem ser incluídos nas decisões de sua comunidade.

A descaracterização que seria decisão extrema poderia ser substituída para aqueles municípios que optassem por entregar o seu comando aos seus cidadãos, o que resultaria num laboratório de gerenciamento cívico. A recircunscrição para a Câmara Federal, proposta por Amorim Neto (2011), apoiada na taxonomia de Carvalho (2003), universalismo e paroquialismo, juntamente com o modelo informacional de Rocha (2010), conseguem atualizar o *accountability* e a *responsiveness* daquela casa. Some-se a isto a utilização do modelo informacional nos parlamentos municipais (*Idem*, 2010), bem como o estudo de ambientes retóricos por Magalhães (2000), que permite repensar o funcionamento dessas arenas.

Tal reinclusão da cidadania nas Câmaras Municipais faz a sonhada torção estrutural com base na argumentação pelos partidos políticos e a deliberação pela população. A sociedade representada num sorteio radical, mesmo que os seus resultados não sejam tão radicais assim. A república pode assumir suas responsabilidades deitando à política o resultado.

## REFERÊNCIAS

ALKMIM DOS REIS, Antônio Carlos. **A participação eleitoral no Brasil (1988-1989)**. 1992. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) - não publicada, Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMORIM NETO, Otávio; CORTEZ, Bruno Freitas; PESSOA, Samuel de Abreu. Redesenhando o mapa eleitoral do Brasil: uma proposta de reforma incremental. **Revista Opinião Pública**, 17, 1(6), 45-45, 2011.

ARRETCHE, Marta. Federalismo e democracia no Brasil: a visão da ciência política norte-americana. **São Paulo em Perspectiva**, 15(4), 2001.

ARRETCHE, Marta. Financiamento federal e gestão local de políticas sociais: o difícil equilíbrio entre regulação, responsabilidade e autonomia. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, 8(2), 331-345, 2003.

ARRETCHE, Marta. Federalismo e políticas sociais no Brasil: problemas de coordenação e autonomia. **São Paulo em Perspectiva**, 18(2), 17-26, 2004.

AVRITZER, Leonardo. **A moralidade da democracia**. São Paulo: Perspectiva, 2012.

BARBOZA FILHO, Rubem. **Tradição e artifício**: iberismo e barroco na formação americana. Belo Horizonte: Ed. UFMG; Rio de Janeiro: IUPERJ, 2000.

CARMO, Erinaldo; CORDEIRO, Gauss Moutinho; ROCHA, Enivaldo Carvalho. Medindo a Alienação e a Participação do Eleitorado nas Eleições Proporcionais de Pernambuco. Trabalho apresentado no III Seminário de Ciência Política da UFPE. Recife, 2006. <[www.seminariopolitica.t5.com.br/docs/Anais/Papers/ST331.pdf](http://www.seminariopolitica.t5.com.br/docs/Anais/Papers/ST331.pdf)> Acesso em 03 nov. 2008.

CARVALHO, Nelson Rojas. **E no início eram as bases**: geografia política do voto e comportamento legislativo no Brasil. Rio de Janeiro: Ed. Revan, 2003.

CONDÉ, Eduardo Salomão. **Laços na diversidade**: a Europa social e o Welfare (1992-2003). Juiz de Fora: Ed. UFJF, 2008.

FERNANDES, Neimar da Silva. **Estatística avançada**. 2012, mimeo.

HOWLETT, Michael; RAMESH, M. **Studying Public Policy**: policy cycles and policy subsystems. Ontario: Oxford University Press, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Censo Demográfico 2000. Brasil, 2003.

KRAUSE, Silvana; DANTAS, Humberto; MIGUEL, Luis Felipe. (Orgs.), **Coligações partidárias na nova democracia brasileira**: perfis e tendências. Rio de Janeiro: Fundação Konrad Adenauer Stiftung; São Paulo: Editora Unesp, 2010.

LIMA JUNIOR, Olavo Brasil. Alienação Eleitoral e Seus Determinantes – nota de pesquisa. **Dados - Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 14, 1990.

MAGALHÃES, Raul Francisco. Ciência, Ficção e Contrafactualidade: aproximações exploratórias. **Série estudos 98 do IUPERJ**, 1997.

MAGALHÃES, Raul Francisco. **Racionalidade e Retórica**: teoria discursiva da ação coletiva. 2000. [--] f. Tese (Doutorado em Ciência Política) - não publicada. Instituto Universitário de Pesquisas do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MIGUEL, Luis Felipe. Sorteios e representação democrática. **Lua Nova**, 50, 2000.

MIGUEL, Luis Felipe. **O nascimento da política moderna**: Maquiavel, utopia e reforma. Brasília: Ed. da UnB, Finatec, 2007.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – ONU; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil**. Mídia. IBGE. CD ROOM, 2003.

REIS, Fábio Wanderley; Castro, Mônica Mata Machado. Democracia, civismo e cinismo. Um estudo empírico sobre normas e racionalidade. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 16, 45, 2001.

REIS, Fábio Wanderley. O Tabela e a lupa: teoria, método generalizante e idiografia no contexto brasileiro. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 6, 16(91), 1991.

RIBEIRO, Luiz César de Queiroz; PRETEICELLE, Edmond. Tendências da segregação social em metrópoles globais e desiguais: Paris e Rio de Janeiro nos anos 80. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 14, 40, 1999.

ROCHA, Marta Mendes da. Representação, deliberação e estudos legislativos. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 25,74(10), 2010.

ROLNIK, Raquel. & KLINK, Jeroen. Crescimento econômico e desenvolvimento urbano. **Novos Estudos**, 89, 2011.

SANTOS, Wanderley Guilherme. **Horizonte do desejo**: instabilidade, fracasso coletivo e inércia social. Rio de Janeiro: Ed. FGV, 2007.

SANTOS JUNIOR, Orlando Alves dos. **Democracia e governo local**: dilemas da reforma municipal no Brasil. Rio de Janeiro: Editora Revan, FASE, 2001.

SOLDATI, Franklin. O voto em Juiz de Fora. Paper apresentado no 33º Encontro Anual da ANPOCS, 2009, GT 11, Democracia, comunicação política e eleições, Caxambu, Anais... Caxambú: **Portal ANPOCS**, 2009.

SOLDATI, Franklin. **O diagrama de significâncias como instrumento de avaliação de tendências**. 2011. 44 f. Monografia (Especialização em Estatística) - Pós-graduação em Métodos Estatísticos Computacionais, ICE-UFJF, Juiz de Fora.

SOLDATI, Franklin. **O eleitorado juizforano nas eleições de 2006 e 2008 para o executivo**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) – PPGCSO / UFJF, Juiz de Fora.

SOUZA, Celina. Governos e sociedades locais em contextos de desigualdades e de descentralização. **Ciência e saúde coletiva**, 7(3), 431-442, 2002.

SOUZA, Celina. Governos locais e gestão de políticas universais. São Paulo em **perspectiva**, 18(2), 27-41, 2004.

TOMIO, Fabricio Ricardo de Limas. Federalismo, municípios e decisões legislativas: a criação de municípios no Rio Grande do Sul. **Revista Sociologia Política**, 06, 123-148, 2005.

## ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE CONFORTO TÉRMICO E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM UNIDADE DE SAÚDE

Data de aceite: 02/06/2020

### **Gabriela Regina Rosa Galiassi**

Graduanda em Engenharia Química,  
Universidade Federal de Mato Grosso

### **Ana Clara Alves Justi**

Doutoranda em Física Ambiental, Universidade  
Federal de Mato Grosso

### **Gabriel Henrique Justi**

Docentes do curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal de Mato Grosso

### **Maribel Valverde Ramirez**

Docentes do curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal de Mato Grosso

**RESUMO:** As pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes fechados, desenvolvendo suas atividades cotidianas. Dessa forma, entender a relação térmica entre o indivíduo e o ambiente ao qual está inserido é primordial, uma vez que dependendo do tipo de relação, as influências exercidas no desempenho das atividades podem ser negativas ou positivas. Assim, objetivou-se analisar o conforto térmico de modo qualitativo e quantitativo e a transferência de calor em uma unidade de saúde de Cuiabá-MT. Para isso, as variáveis temperatura superficial, temperatura do ar,

umidade relativa do ar, velocidade do ar e a temperatura das camadas-limite, foram aferidas durante 3 dias de fevereiro de 2020 e em 4 horários (8h, 11h, 14h e 16h). De posse dos dados, preencheu-se o *software CBE Thermal Comfort Tool*, para obtenção dos resultados quantitativos de conforto térmico e, para aquisição dos resultados qualitativos, utilizou-se as respostas de percepção térmica dos funcionários, respondidas em questionários. Já para o cálculo da transferência de calor, considerou-se apenas o mecanismo de radiação. Foi possível observar que o horário que os funcionários julgaram menos desconfortável foi o de 8h, e o horário de mais desconforto foi o de 16h, mas todos os horários apresentaram resultado de desconforto térmico. A média de calor transferido por dia na sala do posto de saúde foi de 840,68W. Assim, um ar condicionado de 3000 BTUs já seria suficiente para refrigerar o ambiente e trazer conforto térmico aos funcionários em todos os horários.

**PALAVRAS-CHAVE:** Radiação, temperatura, umidade

**ABSTRACT:** People spend most of their time indoors, developing their daily activities. Thus, understanding the thermal relation between the individual and the environment

to which he is inserted is paramount, since depending on the type of relation, the influences exerted on the performance of activities can be negative or positive. Thus, the objective was to analyze thermal comfort in a qualitative and quantitative way and heat transfer in a health unit in Cuiabá-MT. For this, the variables surface temperature, air temperature, relative air humidity, air speed and the temperature of the boundary layers, were measured during 3 days of February 2020 and at 4 schedules (8h00, 11h00, 14h00 and 16h00). With the data in hand, the CBE Thermal Comfort Tool software was filled in to obtain the quantitative results of thermal comfort and, to acquire the qualitative results, the employees' thermal perception responses were used, answered in questionnaires. For the calculation of heat transfer, only the radiation mechanism was considered. It was possible to observe that the time that the employees found the least uncomfortable was 8:00 am, and the most uncomfortable time was 4:00 pm, but all hours showed the result of thermal discomfort. The average heat transferred per day in the health unity room was 840.68W. Thus, an air conditioning of 3000 BTUs would be enough to cool the environment and bring thermal comfort to employees at all times schedules.

**KEYWORDS:** Radiation, temperature, humidity

## 1 | INTRODUÇÃO

O conforto térmico humano, ao contrário do desconforto térmico humano, não é uma percepção que se mensura facilmente. Para que se alcance uma faixa confortável, é necessário que haja uma harmonia entre condicionantes ambientais e fisiológicas e essa sensação deve propiciar a integração do usuário ao seu meio, possibilitando, assim, otimizar o desempenho de suas atividades.

A Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) define que o conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente (ASHRAE, 2017). Já a Organização Internacional de Normalização (ISO), em sua norma nº 7730 de 1994, conceitua o conforto térmico como a sensação de neutralidade térmica experimentada pelo ser humano em determinado ambiente (LAMBERTS, 2011).

A neutralidade térmica é a condição na qual uma pessoa não prefere nem mais calor nem mais frio em relação ao ambiente térmico em que se encontra. Portanto, o corpo humano está em neutralidade térmica quando todo o calor gerado pelo organismo por meio do metabolismo é trocado em igual proporção com o ambiente ao redor (FANGER, 1972).

Com isso, diversos estudos a respeito de conforto têm mostrado que condições desfavoráveis, como excesso ou ausência de calor, umidade, ventilação e renovação do ar, ruídos intensos e constantes, falta de iluminação adequada, odores variados, entre outros, podem ser fontes de tensão no ambiente de trabalho (ANVISA, 2014).

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), em ambientes de serviços de assistência à saúde, onde frequentemente ocorrem situações críticas e estressantes que envolvem relações entre pessoas com algum tipo de sofrimento, seja ele físico, psíquico, ou ambos, os fatores ambientais que definem as condições de conforto

térmico são essenciais para um bom desempenho do profissional e qualidade de atendimento para o paciente (ANVISA, 2014).

Nessa perspectiva, Fanger (1972) estabeleceu o método PMV (Predicted Mean Vote – Voto Médio Estimado,) que permite prever a avaliação térmica do ambiente pelas pessoas, baseado na avaliação de seis fatores: temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar, umidade relativa do ar, vestimenta e atividade.

A partir do PMV, pode-se calcular o PPD. O índice de porcentagem prevista de insatisfação (PPD), fornece informações sobre desconforto térmico ou insatisfação térmica, prevendo a porcentagem de pessoas que provavelmente se sentirão muito quentes ou muito frias em um determinado ambiente (ANVISA, 2014).

É válido mencionar que o conforto térmico está intrinsecamente correlacionado à transferência de calor e pode ocorrer por condução, convecção e/ou radiação (Çengel, 2015). A condução ocorre em sólidos, através do movimento molecular. A convecção acontece entre um fluido e uma superfície. Já a radiação, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas, que podem acontecer entre um gás e uma superfície sólida, ou entre duas ou mais superfícies (KREITH, 2011; SCHMIDT et al., 1996; ÇENGEL, 2015).

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar qualitativamente e quantitativamente o conforto térmico e a transferência de calor em uma unidade de saúde localizada na cidade de Cuiabá-MT.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na unidade de saúde da família, localizado no Bairro Despraiado I, pertencente à cidade de Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, região centro-oeste do Brasil (Figura 01).

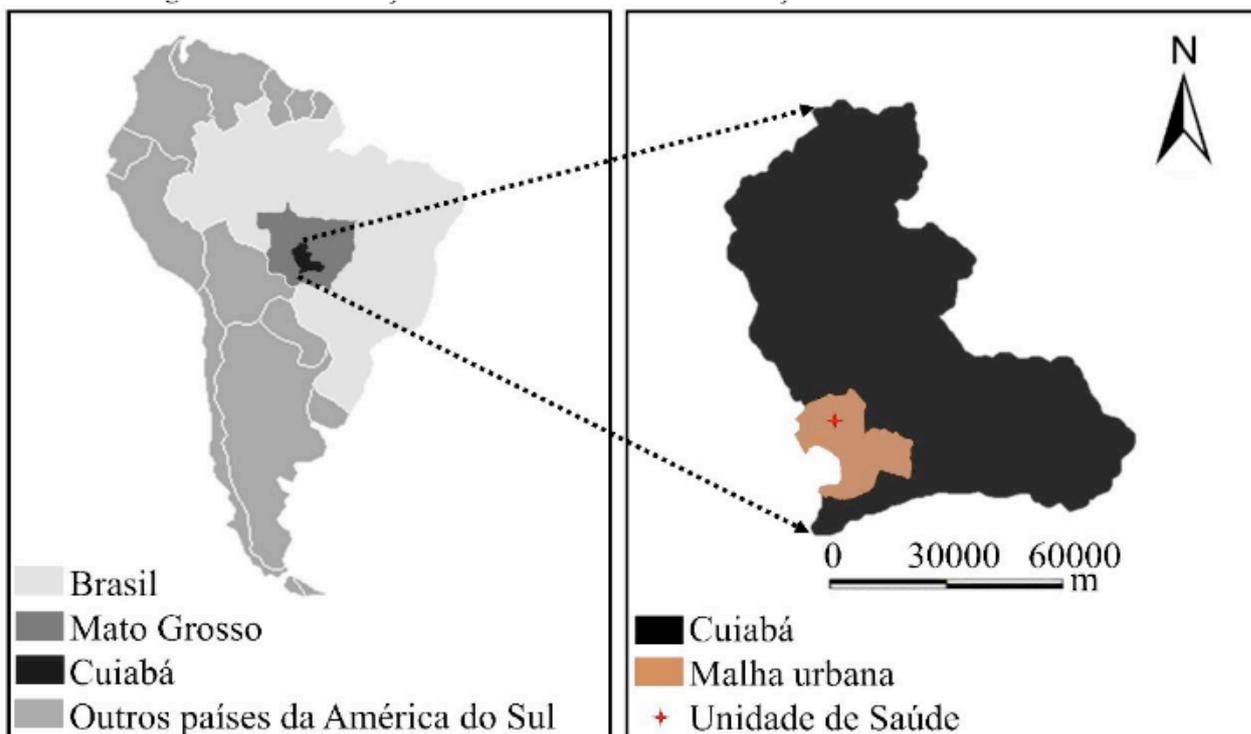


Figura 01 - Localização da Unidade de Saúde em relação à malha urbana de Cuiabá

Na unidade de saúde em questão, foi escolhido apenas um ambiente. Trata-se de uma sala de apoio de 4.1 m<sup>2</sup>, cujas informações coletadas durante as visitas domiciliares, são transcritas e armazenadas pelos funcionários responsáveis, (Figura 02).



Figura 02 - Dimensões específicas da sala amostrada e sua aparência em 3D

Ademais, a sala não possui nenhum tipo de condicionamento do ar, o que é agravado pela circulação de pessoas e pelo funcionamento dos computadores, que possuem tecnologia antiga e, portanto, esquentam mais quando submetidos a longas horas de trabalho.

## 2.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental ocorreu durante três dias de fevereiro de 2020, mês representativo do período chuvoso, com coletas nos períodos matutino (8h00 e 11h00) e vespertino (14h00 e 16h00).

As variáveis ambientais, seus respectivos equipamentos e o processo de aferição são exibidos na Tabela 01.

Variáveis	Equipamentos	Aferição
Temperatura superficial	Etekcitcity Lasergríp 774	Feita nas quatro paredes, no teto, na janela e no chão. Com a distância de 0,45 m da superfície apontada e em uma altura de 0,60 m, conforme a Norma ISO 7726, de 1998.
Temperatura dos fluidos nas camadas-limite	Unity digital indoor/outdoor thermometer TDU-100	Realizada com a distância de 0,10 m da região central da janela e em uma altura de 0,60 m, conforme a Norma ISO 7726, de 1998.
Temperatura do ar Umidade relativa do ar	Tomate termo-higrômetro digital PD-03	Efetuada em um ponto central da sala em uma altura de 0,60 m, conforme a Norma ISO 7726, de 1998.
Velocidade do ar	GM816 Digital anemometer	

Tabela 01 – Variáveis, equipamentos e processo de aferição

Para a coleta das variáveis subjetivas, adotou-se o método de questionários, aplicando-os durante os mesmos dias e horários, aos oito funcionários do local. O questionário foi baseado em sete pontos de percepção, conforme o método descrito na Norma ASHRAE (2017), e adaptado de acordo com BATIZ (2009).

As questões pessoais referentes às vestimentas dos agentes de saúde, não foram questionadas. Contudo, para estimar o isolamento térmico e posteriormente calcular o PMV e PDD, usufruiu-se da opção *Typical summer indoor clothing*, do software *CBE - Thermal Comfort Tool*. Também não foi considerada a variação de gênero e de faixa etária dos envolvidos na pesquisa, pois apesar de constituírem aspectos fundamentais na estimação de conforto térmico, podem ser baseados na estatística populacional brasileira.

O modelo do questionário aplicado é exibido na Figura 02.

<b>Você está se sentindo confortável hoje?</b>	
<b>Sim ( )</b>	<b>Não ( )</b>
<b>Qual sua sensação térmica hoje?</b>	
<b>Levemente quente (com pouco calor)</b>	( )
<b>Quente (com calor)</b>	( )
<b>Muito quente (com muito calor)</b>	( )
<b>Neutro (nem calor, nem frio)</b>	( )
<b>Pouco frio</b>	( )
<b>Frio</b>	( )
<b>Muito frio</b>	( )
<b>Como está o ambiente térmico junto a você agora?</b>	
<b>Extremamente desconfortável</b>	( )
<b>Muito desconfortável</b>	( )
<b>Desconfortável</b>	( )
<b>Pouco desconfortável</b>	( )
<b>Confortável</b>	( )
<b>Como você preferia estar agora?</b>	
<b>Bem mais aquecido</b>	( )
<b>Mais aquecido</b>	( )
<b>Um pouco mais aquecido</b>	( )
<b>Sem mudanças (assim mesmo)</b>	( )
<b>Um pouco mais refrescado</b>	( )
<b>Mais refrescado</b>	( )
<b>Bem mais refrescado</b>	( )
<b>Como está a sua tolerância quanto ao ambiente?</b>	
<b>Intolerável</b>	( )
<b>Muito difícil de tolerar</b>	( )
<b>Razoavelmente difícil de tolerar</b>	( )
<b>Um pouco difícil de tolerar</b>	( )
<b>Tolerável</b>	( )
<b>Perfeitamente tolerável</b>	( )

Figura 02 - Questionário aplicado com a finalidade de obter as variáveis subjetivas

### 2.3 Análise de conforto térmico

De acordo com Torres (2016), o conforto térmico é avaliado a partir do balanço da transferência de calor. Para tal, é necessário considerar que o conforto térmico é uma

condição influenciada pela atividade desempenhada, pelo isolamento térmico das roupas utilizadas, pela temperatura do ar, pela temperatura média radiante, pela velocidade do ar e pela umidade do ar. Ainda, para que o conforto térmico seja atingido, é preciso respeitar três condições: neutralidade térmica; taxa de suor liberada pela pele e temperatura da pele compatíveis ao trabalho desempenhado; e, por último, o indivíduo não pode estar sendo submetido a nenhum desconforto local (nenhuma parte do corpo pode estar submetida a uma fonte constante ou intermitente de fluxos térmicos).

Assim, o cálculo do conforto térmico leva em conta as variáveis subjetivas (taxa metabólica gerada pela atividade desempenhada e isolamento térmico das roupas) e ambientais (temperatura do ar; temperatura radiante média; velocidade do ar e umidade relativa do ar), (TORRES, 2016; LUCAS e SILVA, 2017).

O modelo de Fanger (1972) adota valores, em uma escala de sete pontos, para cada sensação térmica, conforme a Tabela 02.

Sensação	Descrição
3	Muito frio
-2	Frio
-1	Levemente frio
0	Neutro
1	Levemente quente
2	Quente
3	Muito quente

Tabela 02 - Escala de sensação térmica pelo modelo de Fanger (1972)

Este modelo combina a teoria de equilíbrio térmico com a fisiologia da regulação térmica para determinar a faixa de condições de conforto (TORRES, 2016). Ele é uma função das variáveis citadas anteriormente e representados pelos índices PMV e PPD, que partem de um balanço térmico e podem ser calculados pelo software *CBE - Thermal Comfort Tool*. De acordo com Lucas e Silva (2017), um PMV superior a -0,5 e inferior a 0,5 resultará em um PPD inferior a 10%, sendo este o percentual ideal.

### 2.3.1 Temperatura radiante média

De acordo com Fanger (1972), a temperatura radiante média ( $T_{rm}$ ) é definida como a temperatura uniforme de um compartimento imaginário, no qual a transferência de calor radiante do corpo humano é igual à transferência de calor radiante no compartimento não uniforme real. É possível determiná-la através da equação 1, dada por Lamberts (2011):

$$T_{rm} = \sqrt[4]{T_p^4 + \frac{h_p}{\varepsilon_p * \sigma} * (T_p - T_a)} \quad (1)$$

Em que:

$T_{rm}$ : é a temperatura radiante média em K;

$T_p$ : é a temperatura da pessoa (37 °C = 310,15 K);

$\varepsilon_p$ : é a emissividade da pessoa;

$h_p$ : é o coeficiente de transferência de calor médio por convecção do corpo humano em W/m<sup>2</sup> K;

$\sigma$ : é a constante de Stefan-Boltzman (5,67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>);

$T_a$ : é a temperatura do ar em K.

Segundo com Bandeira (2016), a emissividade do corpo humano é 0,93 e o coeficiente de transferência de calor médio por convecção do corpo humano é 2,7 W/m<sup>2</sup>K. Sendo assim, calculou-se uma temperatura radiante média para cada horário, de acordo com os valores das variáveis.

### 2.3.2 Fator de forma

Para Lamberts (2011), o cálculo dos fatores de forma do indivíduo em relação às paredes, teto e piso pode ser realizado através de diagramas ou através das equações 2, 3 e 4.

$$\text{Fator de forma} = f_{m\acute{a}x} * \left(1 - e^{-\frac{(a)}{\tau}}\right) * \left(1 - e^{-\frac{(b)}{\gamma}}\right) \quad (2)$$

Em que:

$$\tau = A + B * \left(\frac{a}{c}\right) \quad (3) \quad \text{e} \quad \gamma = C + D * \left(\frac{b}{c}\right) + E \left(\frac{a}{c}\right) \quad (4)$$

Os valores de  $f_{m\acute{a}x}$  para os coeficientes A, B, C, D e E são fornecidos por Lamberts (2011) e estão na Tabela 03.

Coeficientes	$f_{m\acute{a}x}$ (0,118)	$f_{m\acute{a}x}$ (0,016)
	Pessoa sentada; superfícies verticais: paredes e janelas	Pessoa sentada; superfícies horizontais: teto e piso
A	1,216	1,396
B	0,169	0,130
C	0,717	0,951
D	0,087	0,080
E	0,052	0,055

Tabela 03 - Valores dos coeficientes para o cálculo do fator de forma

Assim, quando analisado a superfície vertical, os valores para os coeficientes a, b e c são comprimento, altura e largura da sala, respectivamente. Quando analisado a superfície horizontal, a, b e c são comprimento, largura e altura da sala, respectivamente.

Para o cálculo dos fatores de forma, foi considerado que o funcionário está situado no meio da sala em relação as paredes, teto e piso. Os valores para os coeficientes a, b e c em cada caso também levaram isso em conta. O fator de forma foi usado para o cálculo da transferência de calor por radiação.

### 2.3.3 Transferência de calor da pessoa

A transferência de calor da pessoa é igual à sua taxa metabólica. De acordo com Çengel (2015), a taxa metabólica de uma pessoa sentada, ao ler, escrever ou digitar é de 108 W. Assim, para saber a transferência de calor das pessoas na sala analisada, foi necessário apenas multiplicar a taxa de uma pessoa pelo número de funcionários. Como geralmente, ficavam dois funcionários por vez na sala, a quantidade de calor transferido pela pessoa em cada hora estudada era de 216 W.

### 2.3.4 Transferência de calor por radiação

Para o cálculo da transferência de calor por radiação através das paredes, utilizou-se a equação de Çengel, (2015):

$$Q_{rad} = A * \sigma * \epsilon_c * F_{12} * (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

Em que:

$A$  : é a área da sala em  $m^2$ ;

$\varepsilon_c$  : é a emissividade do concreto (material das paredes = 0,88);

$F_{12}$  : é o fator de forma calculado pela equação 2;

$T_1$  : é a temperatura da pessoa (37 °C);

$T_2$  : é a temperatura da parede analisada em °C.

Por fim, foi feito o cálculo para cada parede e a soma resultou na transferência de calor por radiação total. Portanto, a média da transferência de calor por radiação total de cada horário estudado, forneceu a transferência de calor diária, sendo em sequência usada para estabelecer o equipamento que precisa adquirir-se, para obter o conforto térmico dos usuários da sala.

### 2.3.5 Preenchimento do software

Para a análise de PMV e PPD no *software CBE - Thermal Comfort Tool*, utilizou-se as variáveis de entrada da Tabela 04.

Horário	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Umidade relativa do ar (%)	Taxa metabólica (W)	Nível de vestimenta (clo)
8h00	26,0	0,1	64	1,0	0,5
11h00	31,0		61		
14h00	29,7		62		
16h00	32,6		49		

Tabela 04 - Variáveis de entrada utilizadas no software CBE Thermal Comfort Tool

Conforme a NBR 6401 (1980), foi definido a velocidade do ar em 0,1 m/s e, para este caso, considerou-se a taxa metabólica de uma pessoa sentada, equivalente a 1,0. Após inserir as variáveis, obteve-se as cartas psicrométricas de cada horário.

Dessa maneira, a faixa azul representa a zona onde a temperatura é confortável para os funcionários e o círculo vermelho representa as condições térmicas correspondentes aos valores de entrada inseridos.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Análise qualitativa de conforto térmico

As variáveis subjetivas coletadas por questionários, podem ser visualizadas em forma

de sensação e conforto térmico apresentados nas Figura 03 a) e b).

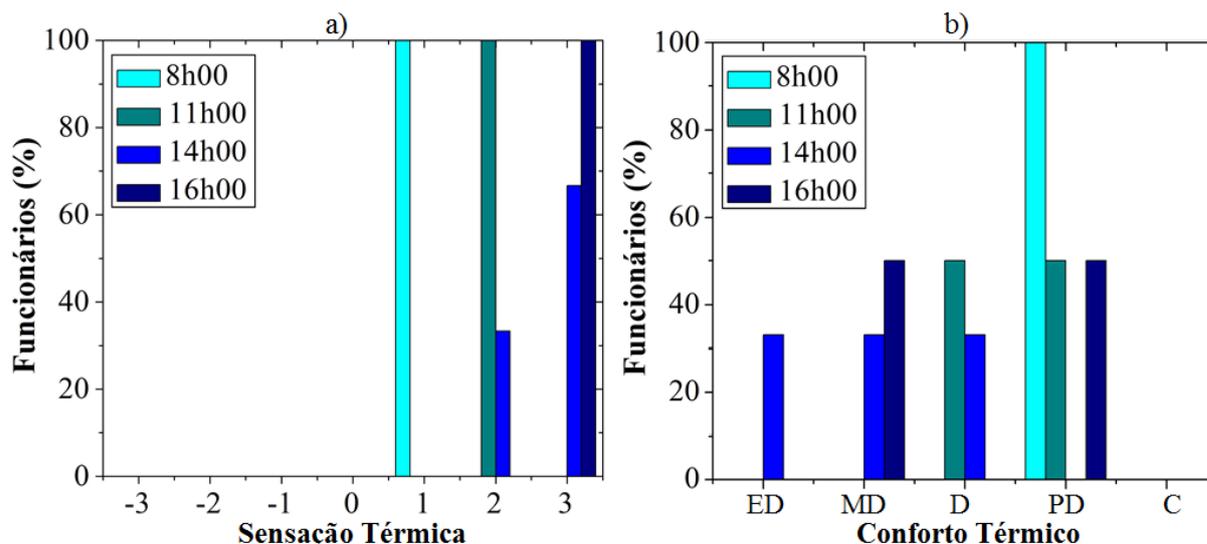


Figura 03 - a) Sensação térmica dos funcionários e b) faixa de conforto térmico dos funcionários representada por extremamente desconfortável (ED), muito desconfortável (MD), desconfortável (D), pouco desconfortável (PD) e confortável (C)

Percebe-se que, às 8h00 da manhã, a sensação térmica foi mais baixa, sendo unânime a sensação “levemente quente” (1). O horário em que a sensação térmica foi mais alta foi o de 16h00, onde 100% dos funcionários responderam que estava “muito quente” (3).

Também foi analisado o conforto térmico, segundo a percepção dos funcionários e observa-se que as opiniões variaram acerca do conforto do local, contudo, em nenhum horário a opção “confortável” foi selecionada.

Os resultados acerca da tolerância térmica quanto ao ambiente são representados por intolerável (I), muito difícil de tolerar (MDT), razoavelmente difícil de tolerar (RDT), um pouco difícil de tolerar (UPDT), tolerável (T) e perfeitamente tolerável (PT). E, da preferência térmica são caracterizados por bem mais aquecido (BMA), mais aquecido (MA), um pouco mais aquecido (UPMA), sem mudanças (SM), um pouco mais refrescado (UPMR), mais refrescado (MR) e bem mais refrescado, (Figura 04 a) e b)).

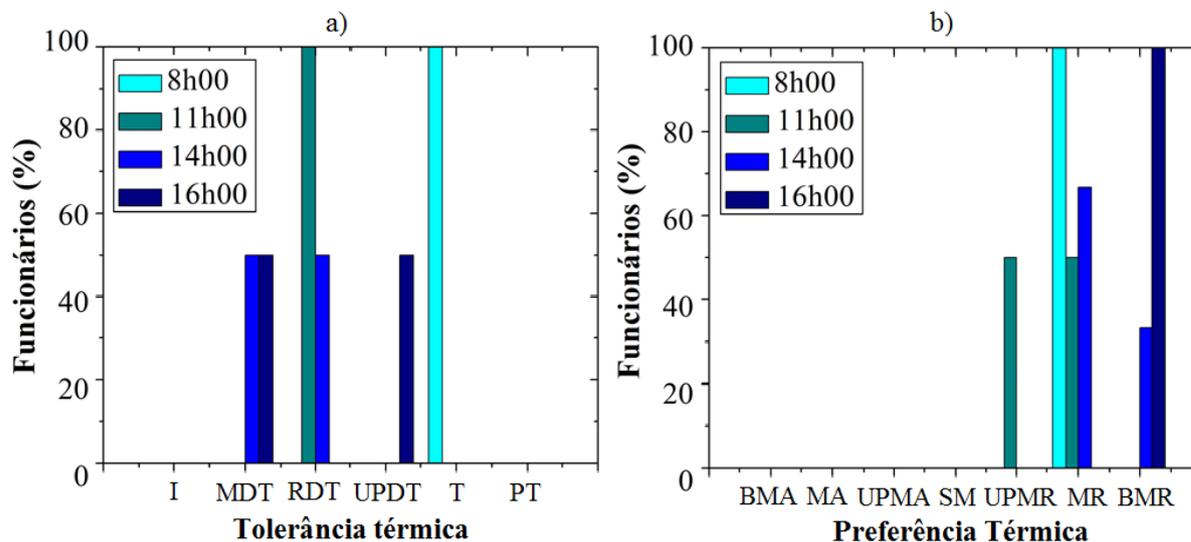


Figura 04 - a) Tolerância térmica e b) Preferência térmica dos funcionários

Nota-se que às 8h00 da manhã, 100% dos funcionários considerou a situação tolerável. Às 11h00, a unanimidade selecionou que estava razoavelmente difícil de tolerar. Às 14h00, as opiniões se dividiram entre “muito difícil de tolerar” e “razoavelmente difícil de tolerar”. Às 16h00, 50% achou pouco difícil de tolerar e 50% achou muito difícil de tolerar.

Acredita-se que, às 16h00, as opiniões se dividiram porque alguns dos entrevistados (100% dos que votaram “muito difícil de tolerar”) chegavam da visitação das casas dos pacientes exatamente nesse horário, e eles fazem as visitações andando debaixo de sol.

Acerca de como os funcionários gostariam de estar, em todos os casos, as únicas opções selecionadas foram “mais refrescado” e “bem mais refrescado”, sendo que às 16h, 100% respondeu “bem mais refrescado” e, às 8h, 100% respondeu “mais refrescado”.

### 3.2 Análise quantitativa de conforto térmico

Os resultados quantitativos de conforto térmico para o horário das 8h00 e 11h00 são evidenciados na Figura 05 a) e b).

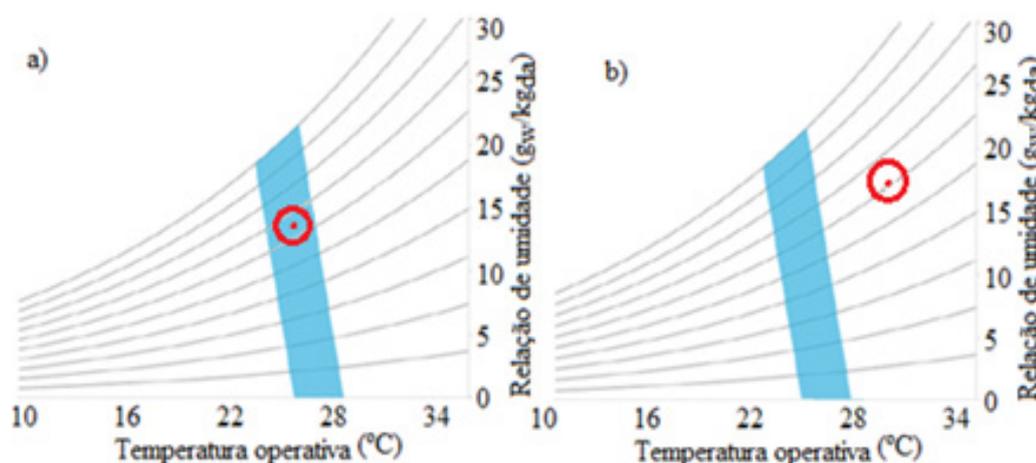


Figura 05 - Resultados da análise quantitativa de conforto térmico para o horário das a) 8h00 e b) 11h00

Observa-se, na Figura 05-a), que os funcionários estão confortáveis. O PPD resultou em 5% e o PMV em 0.09, o que indica a condição de conforto térmico. Este resultado se deu, possivelmente, pois em um dos dias de coleta de dados o tempo estava chuvoso neste horário, deixando a temperatura mais amena, o que não é comum no local. Os resultados obtidos estão em conformidade com a norma ASHRAE Standard 55-2017.

Já em relação a Figura 05-b) mostra que os funcionários não estão em conforto térmico, não concordando, portanto, com a norma ASHRAE 55-2017. Neste caso, o PPD foi de 76% e o PVM foi de 1.99 e a sensação resultou em “quente”, assim como na análise qualitativa.

Os resultados quantitativos de conforto térmico para o horário das 14h00 e 16h00 são exibidos na Figura 06 a) e b).

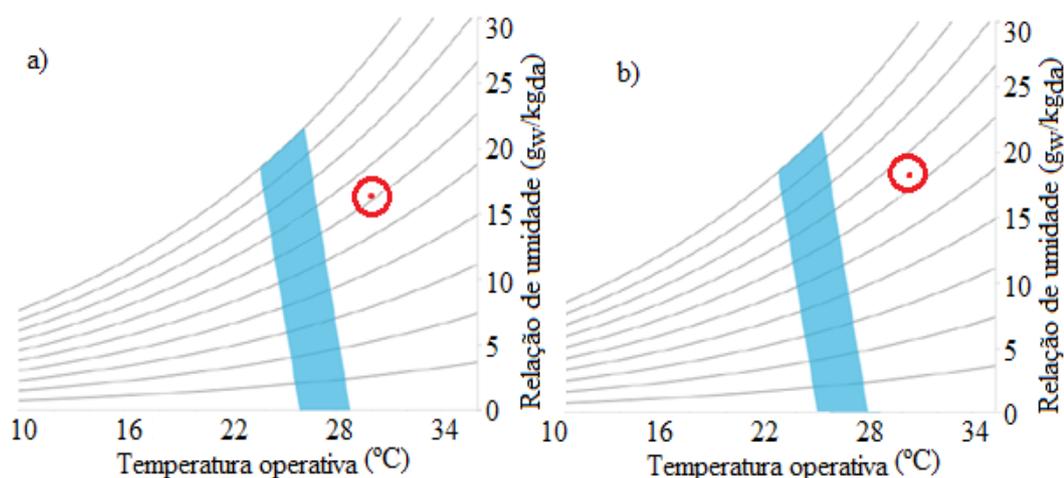


Figura 06 - Resultados da análise quantitativa de conforto térmico para o horário das a) 14h00 e b) 16h00

A Figura 6 a) mostra que o funcionário não estava confortável termicamente. O PPD resultou em 51% e o PMV em 1.50, indicando sensação térmica “muito quente”, condizendo com os 66% dos entrevistados que achavam o ambiente “muito quente” quando responderam o questionário. Portanto, como há desconforto térmico, não há concordância com a Norma ASHRAE 55-2017.

Diferentemente, na Figura 6 b) foi registrado um PPD de 93% e um PMV de 2.47, o que não concorda com a Norma ASHRAE 55-2017, pois não há conforto térmico, como também mostra o círculo vermelho. A sensação térmica resultou em “quente”, distinto da análise qualitativa, onde os funcionários julgaram o ambiente “muito quente”.

### 3.3 Análise da transferência de calor

Os valores obtidos para a transferência de calor total para cada horário analisado, pode ser visualizado na Tabela 05.

Horários	Transferência de calor total (W)
8h00	1019,44
11h00	859,29
14h00	803,89
16h00	680,11

Tabela 05 - Transferência de calor total por horário

Por meio desses resultados, pode-se dizer, portanto, que a média de calor transferido por dia é de 840,68 W. Com isso, para instalar um ar condicionado na sala, é necessário que o equipamento tenha 3000 BTUs, ou seja, aproximadamente 878,7 W.

## CONCLUSÕES

Ficou evidente, neste estudo, a importância da avaliação do conforto térmico em ambientes de trabalho, em especial em locais da área da saúde. Verificou-se que o modelo de avaliação do conforto térmico através do software *CBE - Thermal Comfort Tool* e o questionário descrito na Norma ASHRAE (2017), adaptado de acordo com BATIZ (2009), são instrumentos valiosos para entender esse processo.

Houve correspondência dos dados qualitativos e quantitativos obtidos. Observou-se que o horário mais crítico é o de 16h e o menos crítico, o de 8h. No geral, os funcionários demonstram desconforto térmico, tanto nas análises subjetivas, como nas quantitativas.

Pôde-se apurar, que é necessário a instalação de um ar condicionado no local e que isto gerará conforto térmico aos funcionários que, independente do horário do dia, precisam estar com temperatura em torno de 24°C para que estejam termicamente confortáveis. De acordo com a transferência de calor obtida, um aparelho de 3000 BTUs é o suficiente para fornecer isso.

## REFERÊNCIAS

ANVISA. **Conforto Ambiental em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde/ Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. 1. ed. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2014. 165p.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2017.

BATIZ, et.al. **Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória**. Produção, v. 19, n. 3, set./dez. 2009, p. 477-488.

BANDEIRA, B.D. **Análise das trocas de calor realizadas entre o corpo humano e o ambiente: estudos de caso para uma pessoa realizando atividade física**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Rio de Janeiro – RJ. Junho de 2016.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem**

**prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2015. 902 p.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering**. New York: Mc Graw-Hill, 1972. p. 170.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

LAMBERTS, Roberto, et. al. **Conforto e stress térmico**. LabEEE, UFSC, 2011.

LUCAS, R. E. C.; SILVA, L.B. **Conforto ambiental em sala de aula: Análise da percepção térmica dos estudantes de duas regiões e estimação de zonas de conforto**. In Revista Produção Online. Florianópolis – SC. p. 804-827. 2017.

MACHADO, H. A. **Refrigeração e ar condicionado**. Rio de Janeiro, 2009.

SCHMIDT, F.W. et al. **Introdução as ciências térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. 2ed. São Paulo: Blucher, 1996.

TORRES, MANOEL G. L. **Conforto térmico e desempenho nos ambientes de ensino com inovações tecnológicas – estudo multicase no nordeste brasileiro**. João Pessoa. Dissertação (mestrado) UFPB/CT. 2016.

## ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

Data de aceite: 02/06/2020

Data de submissão: 04/02/2020

### Neilton dos Santos Seguins Costa

Universidade Federal do Maranhão

São Luís – Maranhão

<http://lattes.cnpq.br/8378874485131924>

### Vilson Souza Pereira

Universidade Federal do Maranhão

São Luís – Maranhão

<http://lattes.cnpq.br/0619888126389689>

### Dalmo Inácio Galdez Costa

Universidade Federal do Maranhão

São Luís – Maranhão

<http://lattes.cnpq.br/1141843215844297>

### Paulo César de Oliveira Queiroz

Universidade Federal do Maranhão

São Luís – Maranhão

<http://lattes.cnpq.br/8263828502425458>

**RESUMO:** Fenômenos naturais, como a ação dos ventos, podem gerar efeitos dinâmicos nas estruturas que se não analisados e verificados causam danos catastróficos. Este trabalho teve como objetivo a análise de vibrações em edifícios verticais, utilizando modelagem dinâmica e softwares de análise numérica. O modelo estudado é composto de dez

graus de liberdade, simulando um edifício de estrutura metálica composto de dez andares. É utilizado um modelo simplificado de análise que permite considerar cada andar do edifício como uma massa, com sua rigidez e amortecimento incorporados à estrutura metálica. Foi realizada uma análise de vibração da estrutura usando como entrada uma função que represente as rajadas de vento, estabelecidas em norma regulamentadora, simulando situações que ocorrem naturalmente. A partir deste tipo de análise foi possível obter dados iniciais importantes, como as frequências naturais de vibração e seus modos, sendo importantes resultados relacionados à segurança e confiabilidade da estrutura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ventos. Edificações. Vibração Forçada.

**ANALYSIS OF WIND INDUCED VIBRATIONS IN RESIDENTIAL BUILDINGS**

**ABSTRACT:** Natural phenomena, such as the action of winds, can generate dynamic effects on structures that, if not properly analyzed and verified, may cause catastrophic failure. In this work the main goal is to perform a vibrational analysis in vertical buildings, using dynamic modeling

and numerical analysis software. The specific model has ten degrees of freedom, simulating a ten-store metal structure building. This simplified model allows to perform the analysis by considering each floor of the building as a mass, with its rigidity and damping incorporated into the metallic structure. An analysis of the structure's vibration was performed using as input a function that represents the wind gusts, established in a Brazilian regulatory standard, simulating naturally occurring situations. In this type of analysis, it was possible to obtain important initial data, such as the natural frequencies of vibration and their modes, with important results related to the safety and reliability of the structure.

**KEYWORDS:** Winds. Buildings. Forced Vibration.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os edifícios atuais apresentam um tipo de construção de múltiplos pavimentos, fazendo com que eles se tornem cada vez mais altos e esbeltos e também mais leves. Este tipo de construção vem sendo utilizada em edifícios verticais, principalmente em países que apresentam um crescente aumento populacional, fazendo com que as cidades busquem a verticalização de suas edificações. Estas estruturas são submetidas a diversos tipos de carregamentos os quais podem afetar suas condições originais, provocando vibrações indesejadas, trincas e fissuras, causando incômodo, comprometendo a estrutura e até provocando o colapso, dando origem a acidentes graves.

Um tipo de solicitação são os carregamentos devido a ação do vento, que em estruturas altas e esbeltas requerem atenção especial pelos efeitos causados. Segundo (VIANA e ARAÚJO, 2009), o vento é provocado por diferenças de pressão e deslocamento de massas de ar na atmosfera, é composto por uma parcela constante (velocidade média) e uma parcela flutuante (rajadas), nas quais sua velocidade varia em torno da velocidade média, ocorrendo de forma aleatória em termos de frequências e intensidades. Segundo (WAHRHAFTIG, 2017), o vento não apresenta problemas para construções baixas e pesadas, porém em estruturas esbeltas torna-se particularmente importante, sendo estas mais sensíveis às ações dinâmicas.

Para analisar os efeitos dessas rajadas de vento, hipóteses foram criadas como o método do carregamento estático equivalente (LAZANHA, 2003), que apesar de aplicável a alguns casos não é um dos mais apropriados por desconsiderar efeitos dinâmicos importantes. Modelos matemáticos que descrevem a ação dos ventos são comuns na literatura, como o método do vento sintético utilizado por (BRASIL, PAULETTI, *et al.*, 2003) e (OBATA, 2009), ou a simulação de Monte Carlo, utilizada por (GUIMARÃES e BRITO, 2000) para simular as rajadas de vento em torres metálicas.

Este trabalho tem por objetivo analisar as vibrações provocadas pela ação dos ventos em edifícios verticais de estrutura metálica, utilizando um modelo teórico simplificado, a fim de obter suas frequências naturais de excitação, suas formas modais, e comparar com a norma NBR 6123/1988 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), que regulamenta as condições exigíveis na consideração das forças dos ventos para efeitos de cálculo em edificações. Os resultados são obtidos através de uma análise dinâmica linear

para a qual se utiliza softwares de análise numérica.

## 2 | EQUAÇÕES

### 2.1 Modelagem

Segundo (VIANA e ARAÚJO, 2009), um sistema mecânico vibratório é composto de massa, mola e amortecedor. A massa é responsável pelo acúmulo de energia cinética, a mola representa a rigidez do sistema e armazena a energia potencial elástica, enquanto o amortecedor é responsável por dissipar a energia do sistema. As vibrações em sistemas como esses são provocadas pelo acréscimo de energia que pode ser fornecida ao sistema na forma de deslocamentos, velocidades iniciais, abalos sísmicos ou ação do vento, resultando em um movimento oscilatório em torno da posição de equilíbrio.

Utilizou-se um modelo de dez graus de liberdade, representando um edifício de 10 pavimentos de estrutura metálica como mostra a Figura 1. Onde a função de excitação é representada por  $f_i(t)$ , as massas por  $m_p$ , as rigidezes por  $k_p$ , os deslocamentos por  $x_i(t)$  e  $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ , representado o número de pavimentos. A formulação utilizada para este sistema não inclui amortecimento, porém um amortecimento estrutural é inserido através do módulo de elasticidade da estrutura.

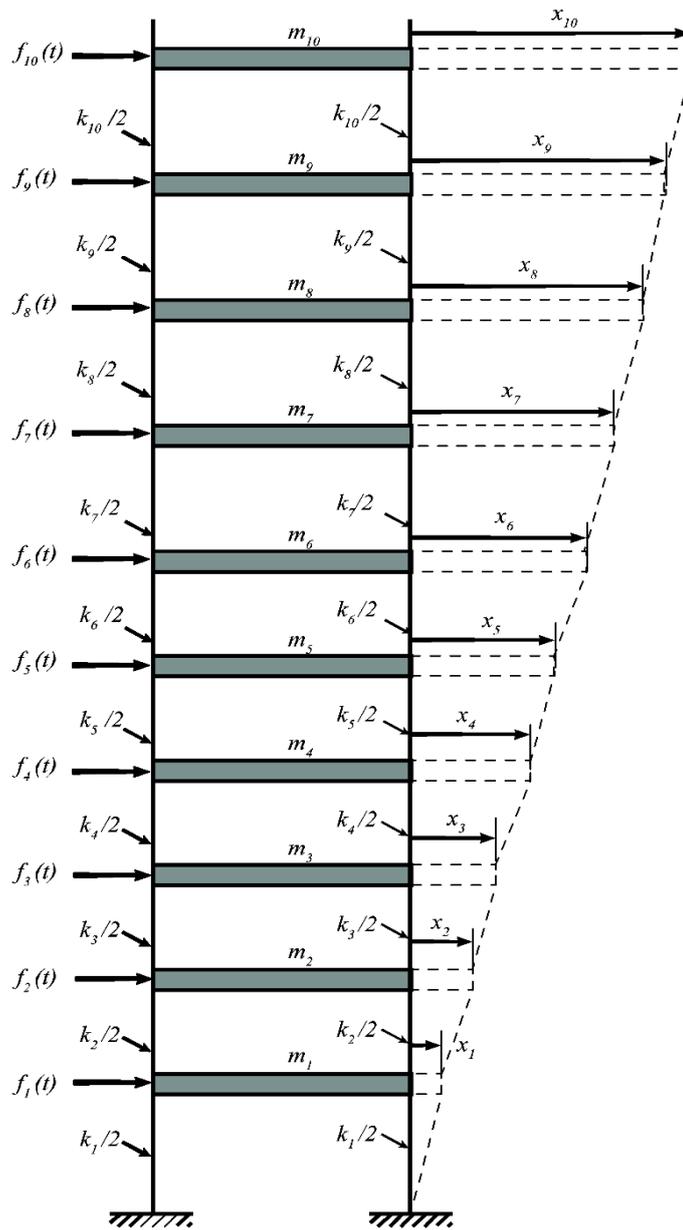


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura do edifício mostrando as massas, rigidezes, deslocamentos e excitação.

Fonte: Autor, 2019.

O sistema está sujeito a uma excitação externa e a sua equação de equilíbrio pode ser expressa na forma matricial como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

onde  $M$  e  $K$  são as matrizes de massa e rigidez, respectivamente, dadas por:

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & m_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m_{10} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$K = \begin{pmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & (k_9 + k_{10}) & -k_{10} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -k_{10} & k_{10} \end{pmatrix} \quad (3)$$

e,  $u$ ,  $\ddot{u}$  e  $F$  são os vetores deslocamento, aceleração e força, respectivamente, dados por:

$$u = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \vdots \\ x_9(t) \\ x_{10}(t) \end{bmatrix}; \ddot{u} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_9(t) \\ \ddot{x}_{10}(t) \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ \vdots \\ f_9(t) \\ f_{10}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.2 Norma NBR 6123/1988

As rajadas de vento podem gerar oscilações importantes em estruturas muito altas e esbeltas, especialmente naquelas com nenhum ou pouco amortecimento. Já em estruturas mais baixas e mais robustas com períodos fundamentais menores que 1 s esses efeitos são quase insignificantes.

Segundo a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), os picos de vento podem ser calculados de duas formas, utilizando o modelo contínuo simplificado e o modelo discreto. O método simplificado foi o escolhido para as finalidades deste trabalho.

O método simplificado se aplica em casos onde a edificação é apoiada exclusivamente na base, não exceda 150 m e a distribuição da massa seja aproximadamente uniforme. Ainda segundo a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), o período fundamental de vibração da estrutura,  $T$ , a razão de amortecimento crítico,  $\zeta$ , e a forma modal,  $Y$ , estão relacionados ao tipo de construção. Para um edifício com estrutura de aço soldada, temos:

$$T = 0,29 \sqrt{h} - 0,4 \quad (5)$$

onde  $h$  é a altura da edificação.

A variação de pressão dinâmica, segundo a norma, é dada em função da altura pela seguinte equação:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[ \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_{ref}} \right)^p \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (6)$$

na qual o primeiro termo dentro dos colchetes é a resposta média, referente à pressão estática e o segundo tem relação com a pressão flutuante. Os parâmetros  $b$  e  $p$ , que dependem da rugosidade do terreno, e também o coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , são dados em tabelas disponíveis na norma,  $z_{ref}$  é a altura de referência, e  $\bar{q}_0$  é a pressão dinâmica inicial do vento, dado em N/m<sup>2</sup>, definido por:

$$\bar{q}_0 = 0,613 \cdot V_p^2 \quad (7)$$

onde  $V_p^2$  é chamada de velocidade de projeto e depende da velocidade básica do vento,  $V_0$ , que varia de acordo com a região e é dada no gráfico de isopletras disponível na norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988),  $S_1$  e  $S_3$ , que estão relacionadas às características topográficas e estatísticas do terreno, respectivamente. Os valores dessas constantes estão listados em tabelas e gráficos da norma. A velocidade de projeto em m/s é dada por:

$$V_p = 0,69 \cdot V_0 \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (8)$$

Para calcular a amplitude da força estática equivalente por unidade de altura (N/m) do edifício, é preciso encontrar o coeficiente de arrasto,  $C_a$ , que pode ser estipulado em um dos gráficos da norma, a dimensão horizontal perpendicular à direção dos ventos,  $L_1$ , e a pressão dinâmica fornecida pela Equação (6), sendo então obtida por:

$$F(z) = q(z) \cdot C_a \cdot L_1 \quad (9)$$

### 3 | METODOLOGIA

O edifício estudado é de estrutura de aço soldada, com 42 m<sup>2</sup> de área, localizado em uma região no centro de São Luís – MA, contendo 10 pavimentos. Cada pavimento possui pé direito de 3 m, todos acima da cota do terreno. As lajes de todos os pavimentos possuem

peso de  $2500 \text{ kg/m}^2$  e uma carga variável de  $200 \text{ kg/m}^2$ . A estrutura é composta de vigas/pilares de aço estrutural, com módulo de elasticidade  $E = 209 \times 10^9 \text{ Pa}$  e perfil comercial do tipo “I” W610X113. Essas massas foram consideradas durante a análise do problema. Considerou-se cada pilar engastado na base, de forma que fosse possível modelar a estrutura como vigas engastadas-livres.

Para encontrar a amplitude de excitação estática, utilizou-se o método simplificado disposto na norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). A estrutura foi excitada com uma força do tipo pulso triangular com período de  $1,188 \text{ s}$  e frequência fundamental de  $0,8415 \text{ rad/s}$ , como mostra a Figura 2, no seu último pavimento onde os efeitos dinâmicos são mais consideráveis.

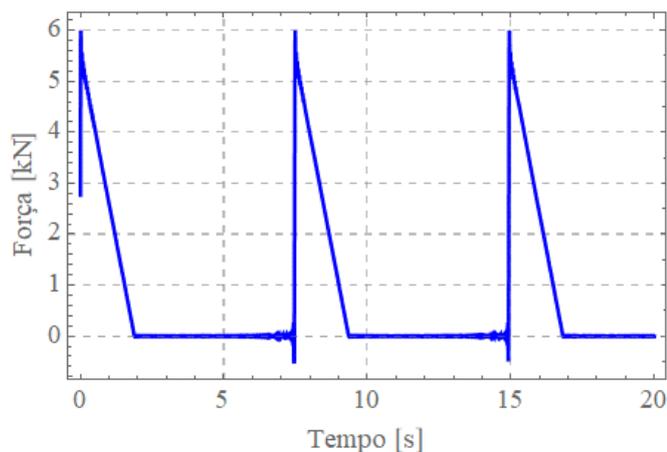


Figura 2 – Representação por série de Fourier do modelo de excitação que simula as rajadas de vento como um pulso triangular.

Fonte: Autor, 2019.

Os dados adotados para a análise estão dispostos na Tabela 1. O sistema foi resolvido com o auxílio do software *Mathematica*.

Dados	
Velocidade básica do vento ( $V_0$ )	30 m/s
Fator topográfico ( $S_1$ )	1,00
Categoria do terreno ( $S_2$ )	Cat. II, Classe B ( $b = 0,74$ e $p = 0,15$ )
Fator estatístico ( $S_3$ )	1,00
Altura do edifício ( $h$ )	30 m
Dimensão perpendicular à linha de ação da força do vento	7 m
Dimensão paralela à linha de ação da força do vento	6 m
Razão de amortecimento crítico ( $\zeta$ )	0,01
Forma modal ( $\gamma$ )	1,20
Coefficiente de amplificação dinâmica ( $\xi$ )	1,53
Coefficiente de arrasto ( $C_a$ )	1,38

Tabela 1 – Dados adotados na análise utilizando o método simplificado.

Fonte: Autor, 2019.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 exibe os valores de pressão dinâmica e estática e as amplitudes da força de excitação em todos os pavimentos para cada tipo de pressão. Esses valores foram determinados utilizando as Equações (5) a (9).

z (m)	Pressão flutuante		Pressão estática	
	q (N/m <sup>2</sup> )	$F_0$ (N/m)	q (N/m <sup>2</sup> )	$F_0$ (N/m)
3	123,8	1196,8	210,5	2033,7
6	177,4	1717,1	259,2	2503,7
9	227,3	2200,3	292,7	2827,6
12	276,1	2673,8	319,1	3082,5
15	325,6	3145,7	341,2	3295,9
18	374,7	3619,5	360,4	3481,2
21	424,1	4096,6	377,4	3645,9
24	473,9	4577,9	392,9	3795,0
27	524,2	5063,6	406,9	3931,4
30	574,9	5553,8	420,1	4057,7

Tabela 2 – Valores da pressão flutuante, pressão estática e amplitude de força segundo a NBR 6123/1988.

Fonte: Autor, 2019.

Pela Figura 3 percebe-se que a amplitude de força dinâmica tem maior relevância quando o edifício é mais alto e esbelto, enquanto que a amplitude estática tem valores maiores que a dinâmica em edifícios mais baixos, o que está de acordo com a norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Portanto, optou-se por fazer uma análise dinâmica da estrutura para observar seu comportamento quando submetida à força dos ventos no seu ponto mais alto.

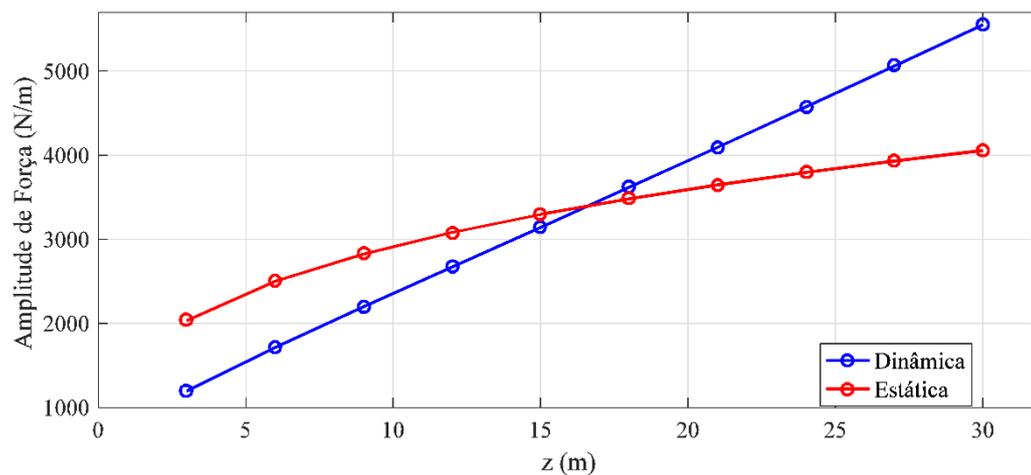


Figura 3 – Variação das amplitudes de excitação dinâmica e estática em função da altura da edificação.

Fonte: Autor, 2019.

Realizou-se uma análise modal da edificação, com a finalidade de encontrar seus modos de vibrar. A Figura 4 exibe os quatro primeiros modos de vibrar da estrutura e suas frequências. Segundo (VIANA e ARAÚJO, 2009), ao considerar somente o primeiro modo fundamental de vibração na contribuição da resposta dinâmica os erros seriam abaixo de 10%.

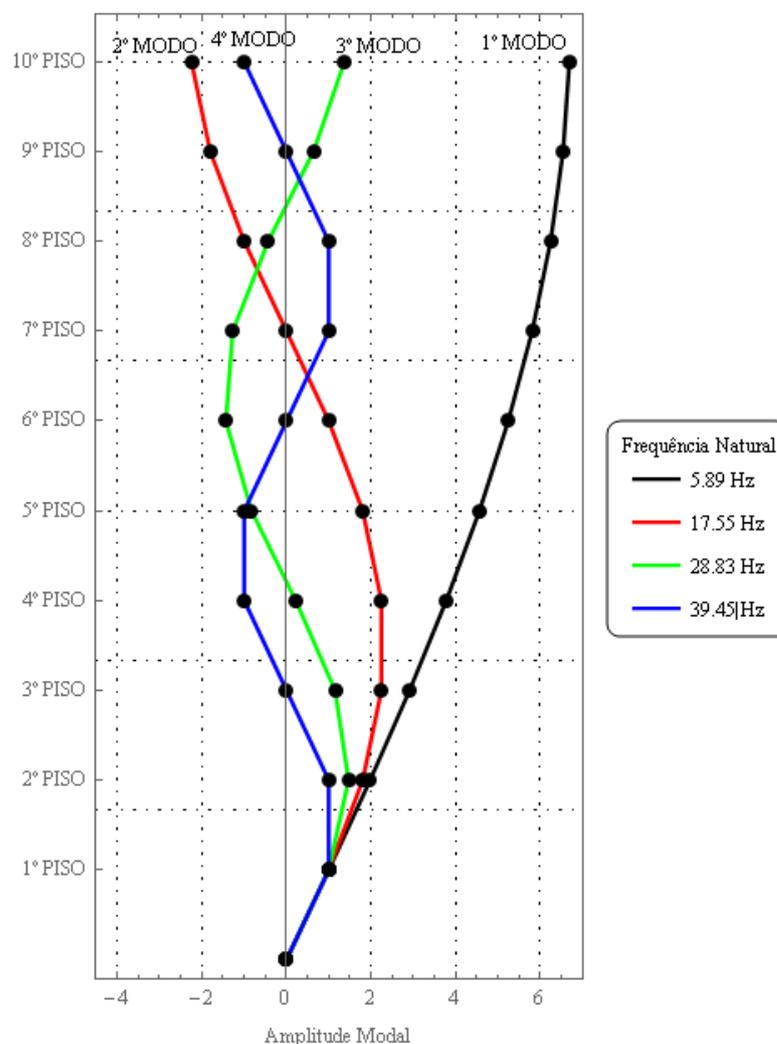


Figura 4 – Variação das amplitudes de excitação dinâmica e estática em função da altura da edificação.

Fonte: Autor, 2019.

A Figura 5 mostra a resposta de deslocamento da estrutura. Observa-se que ao primeiro pulso, ou rajada de vento, a estrutura apresenta um deslocamento de 4 mm e logo após o segundo pulso esse valor sobe para 6,55 mm. Contudo, ao analisarmos em um intervalo de tempo maior, observa-se o fenômeno de batimento, com pacotes de onda se propagando periodicamente na estrutura. Isso mostra que o valor da frequência de excitação se encontra em uma faixa próxima das frequências naturais da estrutura. Em casos como esses, uma análise mais refinada do modelo deve ser testada a fim de avaliar essas frequências. A Figura 6 exhibe o fenômeno de batimento que ocorreu na estrutura. Este fenômeno ocorre principalmente devido essa proximidade entre as frequências naturais da estrutura e a frequência de excitação da mesma.

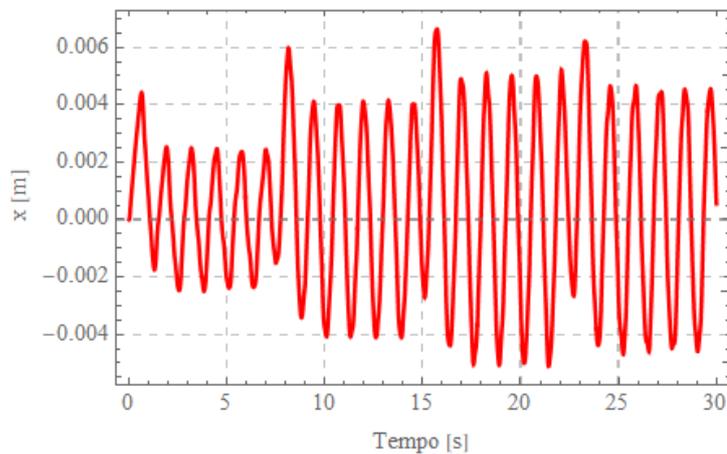


Figura 5 – Variação das amplitudes de excitação dinâmica e estática em função da altura da edificação em um intervalo de 30 s.

Fonte: Autor, 2019.

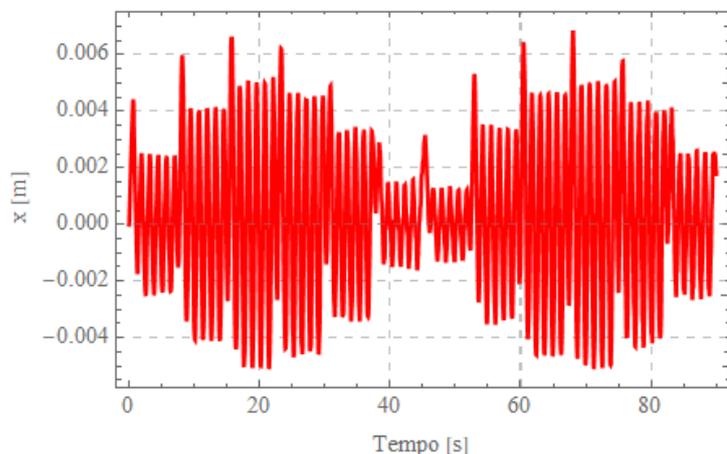


Figura 6 – Variação das amplitudes de excitação dinâmica e estática em função da altura da edificação em um intervalo de 90 s.

Fonte: Autor, 2019.

## 5 | CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi analisar as vibrações provocadas pelo vento em edifícios verticais de estrutura metálica. Utilizou-se um sistema composto por dez graus de liberdade, simulando os 10 pavimentos da edificação, não amortecido e excitado pela ação de uma força do tipo pulso triangular para simular a ação dos ventos. A norma NBR 6123/1988, que trata das condições exigíveis na consideração das forças devido à força dos ventos, foi consultada como meio de obter e comparar os parâmetros usados na análise e os resultados obtidos.

Os valores das forças do vento foram calculados utilizando o método simplificado descrito na norma e suas amplitudes usadas para excitar a estrutura especialmente no último pavimento, que por ser mais alto é o que mais sofre com a ação das rajadas de vento.

Os resultados mostraram que a pressão dinâmica tem maior importância quando consideramos edifícios mais altos e esbeltos, de acordo com a norma, e que construções

inferiores a 16 m são mais afetadas pela pressão estática, não sofrendo tanto com a ação do vento por serem menores e mais robustas. Também foi possível analisar os modos de vibrar da edificação e suas frequências naturais de vibração. Esses dados nos dizem como a estrutura se comporta em determinada faixa de frequência, permitindo ao projetista ter uma estimativa de qual faixa evitar, podendo estimar se em determinada região essas frequências ocorrem ou não. Por fim, fez-se a análise dos deslocamentos no último pavimento da estrutura quando submetida às rajadas de vento. O valor máximo chegou a 6,55 mm, o que é aceitável para uma estrutura de 30 m de altura fracamente amortecida. Pôde-se observar também que a estrutura apresentou o fenômeno de batimento quando analisamos seu comportamento em intervalos de tempo maiores. Isso indica que as frequências fundamentais da estrutura se encontram consideravelmente próximas às frequências de excitação.

No geral, os resultados ficaram dentro do esperado, em concordância com a norma, e apesar de ser utilizado um modelo simplificado, foi possível obter informações importantes a respeito da estrutura. Contudo, por se tratar de um modelo simples e puramente teórico, outras análises devem ser realizadas como forma de validação dos resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.

BRASIL, R. M. L. R. F. et al. **Efeito do vento sobre uma torre para telecomunicações em concreto pré-moldado**. V Simpósio EPUSP de Estruturas de Concreto. São Paulo: [s.n.]. 2003. p. 98-100.

GUIMARÃES, M. J. R.; BRITO, J. L. V. **Análise estática e dinâmica de torres metálicas autoportantes**. In: Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia – Cilamce. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2000. p. 18-37.

LAZANHA, E. C. **Análise dinâmica elasto-plástica de estruturas metálicas sob excitação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

OBATA, S. H. **Vento sintético e a simulação de Monte Carlo – uma forma de considerar a característica aleatória e instável do carregamento dos ventos em estruturas**. Exacta, São Paulo, v. VII, p. 77-85, 2009.

VIANA, A. C. P.; ARAÚJO, T. D. **Análise dinâmica bidimensional de edifícios submetido a rajadas de vento**. Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia – Cilamce. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2009. p. 01-07.

WAHRHAFTIG, M. A. **Ação do vento em estruturas esbeltas com efeito geométrico**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2017.

## TRANSPORTE DE CROMO (CR<sup>+3</sup>) E NÍQUEL (NI<sup>+2</sup>) EM CAMADA DE SOLO COMPACTADA

Data de aceite: 02/06/2020

### Leonardo Ramos da Silveira

Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia de Goiás. Campus Águas Lindas.  
leonardo.silveira@ifg.edu.br

### Newton Moreira de Souza

Universidade de Brasília - Programa de  
Pós Graduação em Geotecnia. nmsouza@  
unb.br

### André Luis Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília - Programa  
de Pós Graduação em Geotecnia.  
cavalgantelb@yahoo.com.br

**RESUMO:** O acúmulo de contaminantes no solo é consequência dos processos físico-químicos de interação solo-contaminante originados do transporte destes contaminantes através do solo. Torna-se, portanto necessário o desenvolvimento de pesquisas que mostrem como o processo de migração de metais ocorrem na matriz do solo. O objetivo deste trabalho foi verificar o transporte dos contaminantes Cromo (Cr<sup>+3</sup>) e Níquel (Ni<sup>+2</sup>) em camada de solo compactada. A pesquisa foi realizada com ensaios de caracterização geotécnica de solos, ensaios geoambientais (difusão

e sorção) em laboratório. Os resultados indicam que o solo em estudo trata-se de um típico solo laterítico do DF, e que o mesmo possui coeficiente de permeabilidade que o faz apresentar condições para ser usado como um *liner* compactado. Os resultados com as soluções sintéticas monoespécie, indicam a tendência para este tipo de ensaio, concentração diminuindo em função do tempo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transporte, metais, cromo, níquel, solo compactado.

### CHROME (CR<sup>+3</sup>) AND NICKEL (NI<sup>+ 2</sup>) TRANSPORTATION IN COMPACTED SOIL LAYER

**ABSTRACT:** The accumulation of contaminants in the soil is a consequence of the physical-chemical processes of soil-contaminant interaction originated from the transport of these contaminants through the soil. It is therefore necessary to develop research to show how the process of metal migration occurs in the soil matrix. The objective of this work was to verify the transport of contaminants Chromium (Cr + 3) and Nickel (Ni + 2) in compacted soil layer. This survey conducted geotechnical soil characterization tests, geo-environmental tests (diffusion and sorption) in the laboratory.

Results indicate that the soil under consideration is a typical laterite soil from the DF, and its coefficient of permeability allows the soil to be used as a compacted liner. However, results of the synthetic monospecies solutions indicate the tendency for this type of test, the concentration decreases as a function of time.

**KEYWORDS:** Transport, metals, chrome, nickel, compacted soil.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os processos de acumulação e transporte de contaminantes através do solo dependem da natureza do contaminante e do tipo do solo em questão. A composição e as propriedades dos resíduos são fatores significativos no desenvolvimento da interação com o substrato do solo. Se, contudo, for possível estimar as propriedades físicas e químicas mais importantes dos contaminantes e conhecer bem as características do solo, poderemos compreender melhor o seu transporte e, assim, dimensionar melhores barreiras naturais ou artificiais para áreas contaminadas ou para futuras áreas de disposição do resíduo (DEMUELENAERE, 2004).

As trocas iônicas representam as principais interações entre o solo e as substâncias nele adicionadas e estão diretamente relacionadas com a fração argila e silte do solo. Os solos são em sua grande maioria eletronegativos, sendo capazes de adsorver as cargas opostas, os cátions, como o  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$  e os metais pesados como  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ . Essa capacidade dos solos é chamada de capacidade de troca de cátions (CTC), que é a quantidade de cátions que um solo é capaz de reter por unidade de peso (PICARELLI, 2003).

Atributos do solo, tais como pH, teor de matéria orgânica, textura e composição das argilas, potencial redox, competição entre metais pelos sítios de adsorção, reações de complexação, temperatura e atividade microbiana são responsáveis pelo controle dos processos de degradação do conteúdo orgânico do resíduo e consequente solubilidade e mobilidade dos metais. Estudos de fracionamento de metais pesados realizados por Amaral Sobrinho et al. (1997) e Gomes et al. (1997) indicaram a importância dos óxidos de Fe e Al na retenção de metais, por meio de mecanismos de adsorção específica e/ou co-precipitação.

Os argilominerais juntamente com a matéria orgânica são os principais responsáveis pela troca de cátions no solo. A origem das cargas negativas na superfície das partículas minerais e orgânicas tem duas formas principais: substituição isomórfica na estrutura cristalina e por dissociação de íons  $\text{H}^+$ . Assim um dos fatores que interferem diretamente na CTC é o pH, pois as cargas superficiais originadas da dissociação de íons  $\text{H}^+$  formam-se quando há um aumento da concentração de íons  $\text{OH}^-$  na solução, provocando a saída de íons de  $\text{H}^+$  da superfície dos óxidos, argilominerais e matéria orgânica. Ou seja, a CTC aumenta com o aumento do pH.

O impacto da contaminação e/ou poluição por metais pesados não deve ser avaliado somente pelo seu teor total em solos, mas pela sua biodisponibilidade, que é uma propriedade relacionada com sua mobilidade no solo e absorção pelas plantas (Costa *et al.*, 2007). O risco associado aos metais está principalmente ligado ao fato do solo ser capaz de armazenar estes

metais. Embora os metais pesados sejam cumulativos no solo, diversos fatores interferem na dinâmica da sua disponibilidade tais como o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a textura e o teor de matéria orgânica.

Portanto, o conhecimento dos mecanismos de transporte simultâneo da água e de solutos no solo é essencial para pesquisas que envolvam pontos de vista ambiental e econômico, uma vez que abrange tanto a eficiência do uso da água quanto à aplicação de resíduos agroindustriais na produção agrícola, ou até mesmo a aplicação de lodo de esgoto. Esses insumos, quando aplicados acima da capacidade-suporte do solo, podem liberar íons e compostos tóxicos, os quais poderão poluir o solo e as águas subterrâneas. A lixiviação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Entre os atributos químicos que afetam a lixiviação, estão a capacidade de retenção de íons e o pH (SANTOS et al., 2002).

Desta forma, dependendo das condições ambientais, os metais podem estar presentes no solo em formas não disponíveis para as plantas. Neste caso, a transferência de metais, para a cadeia alimentar, dependerá das características de cada solo e do tipo de planta, visto que as espécies vegetais têm capacidades variáveis de absorção de metais (SANEPAR, 1999). A medição da presença dos metais no solo é normalmente feita com a indicação de massa por massa seca (mg/kg). A implantação de estudos geotécnicos e ambientais configura-se como medida para o entendimento da dinâmica de transporte e dinâmica de mobilidades de metais para o meio ambiente. É neste contexto que este trabalho tem como objetivo verificar o transporte dos metais cromo e níquel em camada de solo compactada.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O solo para esta pesquisa foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto ETE Samambaia/Melchior. O mesmo foi conduzido para o laboratório de Geotecnia na Universidade de Brasília para posterior caracterização. Os ensaios de caracterização física consistiram basicamente de umidade higroscópica ( $w_0$ ), massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ), análise granulométrica convencional, limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade (IP), massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), índice de vazios ( $e$ ) e porosidade ( $n$ ).

A umidade higroscópica ( $w_0$ ) foi determinada de acordo com o ensaio preconizado pela NBR 6457 (ABNT, 1986). A massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ) determinada de acordo com a norma da NBR 6508 (ABNT, 1984). Análise granulométrica, determinação preconizada das normas da NBR 7181 (ABNT, 1984) e NBR 13602 (ABNT, 1996). Esta metodologia foi aplicada de duas maneiras: com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio. Além disso, utilizou-se o granulômetro a laser modelo “Microtrac s 3500”. Foram realizados então os ensaios de compactação em equipamento em miniatura ME 228 (DNER, 1994), solos compactados em equipamento em miniatura Mini-MCV ME 258 (DNER, 1994), Solos compactados em miniatura – Determinação da perda de massa por imersão ME 256 (DNER, 1994).

Os limites de consistência foram determinados conforme a NBR 6459 (ABNT, 1984)

limite de liquidez, e limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984). O ensaio de compactação para obtenção da curva de compactação e a massa específica aparente seca foi determinada conforme a NBR 7182 (ABNT, 1986), obtendo-se a massa específica aparente seca para cada umidade de solo compactado de forma dinâmica, ensaio tipo Proctor Normal, gerando desta forma uma curva de compactação. A permeabilidade foi determinada a partir da norma NBR 14545 (ABNT, 2000), que determina o coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Neste ensaio a determinação foi feita tanto com o corpo de prova moldado no bloco em estado natural e compactado em diferentes umidades.

O ensaio de difusão utilizado foi o desenvolvido por Barone et al. (1989) e adaptado por Boscov (1997) para solos compactados. As células de difusão utilizadas foram às desenvolvidas por Gurjão (2005), essas células foram construídas em acrílico medindo 11.7 cm de altura e 9.7 cm de diâmetro, com base e topo parafusáveis e anéis de vedação (*o-rings*), a fim de se obter uma estanqueidade total da célula. O corpo de prova utilizado tinha 3 cm de altura e diâmetro igual a 9,7 cm. Este experimento foi realizado conforme os descritos por Gurjão (2005), com concentrações decrescentes em cada reservatório. Os corpos de prova foram compactados nas células de difusão com a energia proctor normal, com grau de compactação de forma a assegurar que os mesmos ficassem com a massa específica aparente seca determinada na curva de compactação. Os corpos de prova foram saturados de forma a obter no mínimo 95% de saturação. Todo este experimento foi realizado na condição saturada.

## 2.1 ENSAIO DE DIFUSÃO COM CLORETO DE CROMO ( $\text{Cr}^{+3}$ )

A solução sintética de cloreto de cromo foi produzida nas concentrações de 0,25g, 0,5g, 1g, 2g e 4g de cromo para a solução de um litro de cloreto de cromo 3 hexahidratado, ou seja, 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L e 4000 mg/L de cromo para cada célula ensaiada (Figura 1).



Figura 1 – Soluções de  $\text{Cr}^{3+}$  preparadas nas diferentes concentrações

Amostras da solução na célula (Figura 1.2) foram coletadas em intervalos de 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 e 36 dias através do orifício na tampa da célula, por meio de uma seringa descartável, para monitoramento da concentração em ensaio de absorção atômica. Esta determinação foi realizada no Laboratório de Saneamento da Universidade de Brasília.

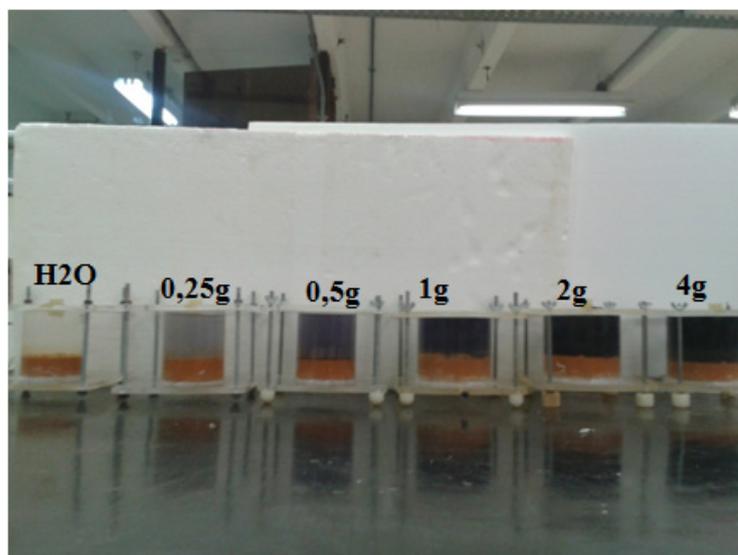
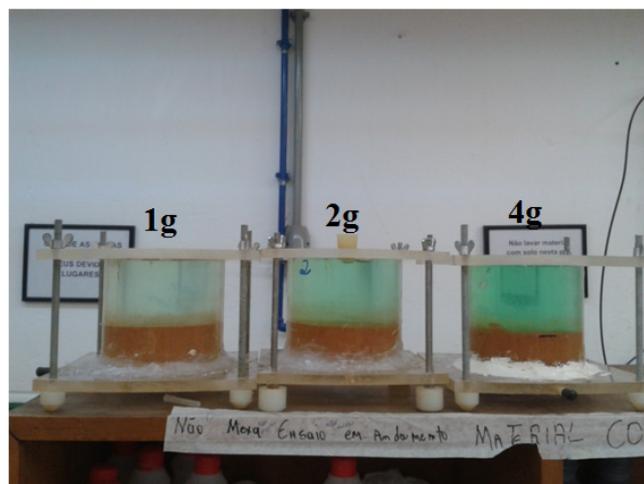


Figura 1.2 – Diferentes concentrações da solução contaminante.

## 2.2 Ensaio De Difusão Cloreto De Níquel $N^{+2}$

Para o ensaio de difusão com a solução sintética de níquel, os *liners* foram compactados nas células de difusão com a energia proctor normal, com grau de compactação de forma a assegurar que os mesmos ficassem com a massa específica aparente seca determinada na curva de compactação. Os corpos de prova foram saturados de forma a obter 95% de saturação. Todo este experimento foi realizado na condição saturada.

As soluções sintéticas de cloreto de níquel (Figura 1.3) foram produzidas nas concentrações de 1g, 2g e 4g de níquel para a solução de cloreto de níquel hexahidratado, ou seja 1000 mg/L, 2000 mg/L e 4000 mg/L de níquel para cada célula ensaiada.



Amostras da solução, na célula, foram coletadas em intervalos de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 dias através do orifício na tampa da célula, por meio de uma seringa descartável, para monitoramento da concentração em ensaio de absorção atômica. Esta determinação foi realizada no Laboratório de Saneamento da Universidade de Brasília. Para a determinação de níquel o solo foi fatiado em três camadas e as amostras foram encaminhada para o Laboratório Solo Química.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise granulométrica elaborou-se a Tabela 1 com as porcentagens passantes em cada peneira. Nota-se que quando o solo é ensaiado sem defloculante, não há identificação da presença de argila, mas somente pedregulho, areia e silte, sendo o silte predominante com 45%. Dessa forma o solo sem defloculante classifica-se como silte arenoso. Já para o solo ensaiado com defloculante têm-se 42% de argila e 32% de silte, o que determina uma classificação como argila siltosa.

D(mm)	Classificação	Sem defloculante (%)	Com defloculante (%)
6,0 – 20,0	Pedregulho médio	1,8	0,9
2,0 – 6,0	Pedregulho fino	8,2	4,3
0,6 – 2,0	Areia grossa	7,4	10,6
0,2 – 0,6	Areia média	16,4	5,9
0,06 – 0,2	Areia fina	20,8	4,4
0,002 – 0,006	Silte	45,4	32,02
< 0,002	argila	0,0	41,75
Solo		Silte arenoso com pedregulho	Argila Siltosa

Tabela 1 – Resultado da análise granulométrica.

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado de forma convencional encontrando-se um valor de 2,68 g/cm<sup>3</sup>. O mesmo procedimento foi realizado para o ensaio de limite de Atterberg, onde observa um limite de liquidez de 54%, e limite de plasticidade de 39%.

Após a classificação MCT por meio do ensaio de mini compactação, e a classificação MCT expedita, pode notar que o solo enquadra-se dentro das areias lateríticas. Diferentemente dos observados na Tabela granulométrica, o solo foi classificado como arenoso laterítico, no entanto corroboram com a grande quantidade de areia para o mesmo. A massa específica aparente seca máxima foi 1,38 g/cm<sup>3</sup> e umidade ótima de 27,5%, índice de vazios de 0,94 e porosidade de 48%.

O ensaio de permeabilidade foi realizado com a amostra indeformada natural,

moldado no cilindro de compactação, e amostras compactada na umidade ótima de compactação (27,5%), obtendo-se os seguintes valores respectivamente  $2,2 \times 10^{-5}$  e  $4,5 \times 10^{-9}$ . De acordo com Nogami e Villibor (1995), os solos da classe LA', são solos de baixa permeabilidade ou impermeáveis quando compactados variando numa faixa de  $10^{-9}$  a  $10^{-8}$  m/s, observa-se que os valores ficaram dentro dos previstos para este tipo de solo.

Foram realizadas análises químicas no solo. A Tabela 1.2 apresenta os valores do resultado para a caracterização do solo da área experimental na ETE Samambaia/Melchior.

Valores medidos	Valor
pH em H <sub>2</sub> O, sem unidade	6,0
pH em KCl, sem unidade	4,8
Fósforo – P, em mg/dm <sup>3</sup> = ppm	0,2
Cálcio – Ca, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,6
Magnésio – Mg, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,1
Potássio – K, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,07
Sódio – Na, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,03
Alumínio – Al, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,0
Acidez (H+Al), em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	3,2
Soma das bases, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	0,8
CTC, ou T, em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = mE/100mL	4,0
Saturação de Bases – V, em %	20,0
Saturação por Alumínio – m, em %	0,0
Saturação com Sódio – ISNa, em %	0,8
Carbono Orgânico – C, em g/kg	11,5
Matéria orgânica – MO, em g/kg	19,8
<b>Metais pesados</b>	
Cromo	<0,01
Cádmio	<0,01
Níquel	<0,01
Cobre disponível – Cu, em mg/dm <sup>3</sup> = ppm	1,24
Manganês – Mn, em mg/dm <sup>3</sup> = ppm	0,22
Zinco – ZN, em mg/dm <sup>3</sup> = ppm	1,04

Tabela 1.2 – Caracterização do solo no local do experimento da ETE Samambaia/Melchior.

### 3.3 Ensaio De Difusão Solução Sintética De Cr<sup>+3</sup>

O ensaio de difusão para a solução de cromo foi realizado com a concentração crescente no reservatório, sendo elas: 250 mg/L, 500 mg/L, 1000 mg/L, 2000 mg/L, e 4000 mg/L, o ensaio teve a duração de 36 dias. As Figuras 1.4 e 1.5 apresentam os resultados para a concentração no reservatório, e nas camadas de solo respectivamente. Já a Figura 1.6 apresenta os dados de coeficiente de difusão, e as curvas dos dados experimentais e as curvas do modelo matemático.

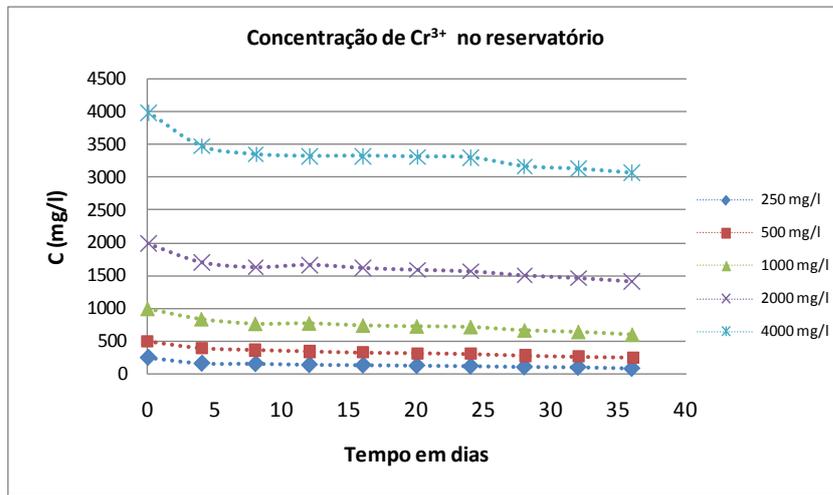


Figura 1.4 – Concentração de cromo no reservatório.

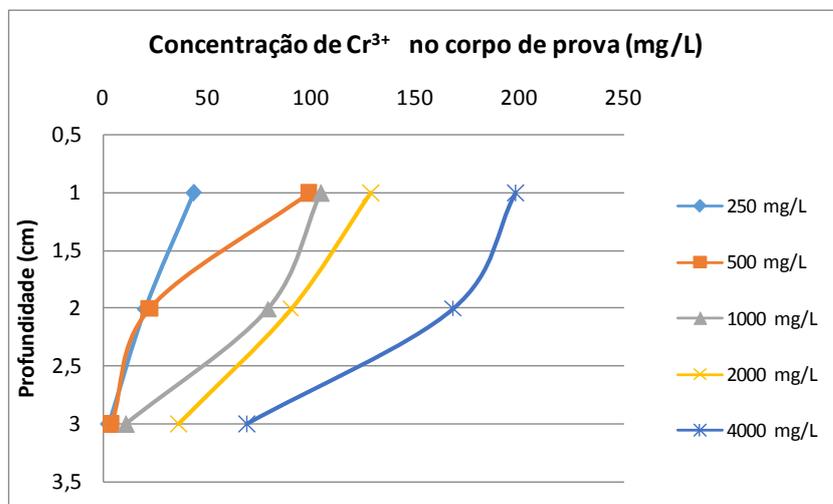


Figura 1.5 - Concentração de cromo nas camadas de solo no 36º dia.

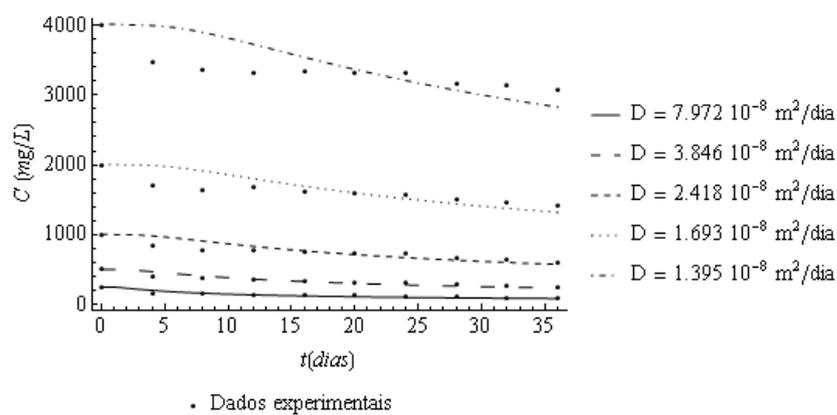


Figura 1.6 – Coeficientes de difusão para as diferentes concentrações.

Ao analisar a Figura 1.4, quando se trata de um ensaio de difusão com uma única espécie, observa-se claramente a diminuição dos valores da concentração em função do tempo, isso se torna mais perceptível para as concentrações de 2000 mg/L e 4000 mg/L.

As quedas de concentração ocorrem até no máximo no décimo dia, depois estabilizando,

fato este relacionado à capacidade máxima do solo em sorver este metal. Todas as curvas de concentração ao longo do corpo de prova, Figura 1.5, para as diferentes concentrações, observa-se uma diminuição do topo para a base. Nota-se que quando não há competição multiespécies (ensaio com uma única espécie) a diminuição da concentração do metal no solo diminui a medida que se afasta da fonte contaminante. As concentrações adotadas para o referido ensaio estão bem acima dos normatizados para este referido metal, e isso ocorreu pelo fato da determinação ser realizada via absorvância.

Analisando a Figura 1.6 observa-se valores de coeficiente de difusão da mesma ordem de  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/dia, variando somente os valores decimais, ainda pode-se notar um bom ajuste do modelo matemático e dos dados experimentais.

Já a classificação de acordo com a Norma Conama nº420 de 2009, observa-se que todos os valores estão acima dos citados para o valor de classe 4, ou seja, são solos que apresentam pelo menos uma substância química com os valores acima dos valores de investigação, sejam ele, agrícola, residencial, ou industrial.

### 3.4 Ensaio De Difusão Solução Sintética De Ni<sup>+2</sup>

A determinação da difusão para o níquel foi realizada em três concentrações 1000, 2000 e 4000 mg/L, com a duração de 22 dias. A Figura 1.7 apresenta os dados da concentração no reservatório, já a Figura 1.8 apresenta a concentração nas camadas de solo, e a Figura 1.9 os valores de coeficiente de difusão.

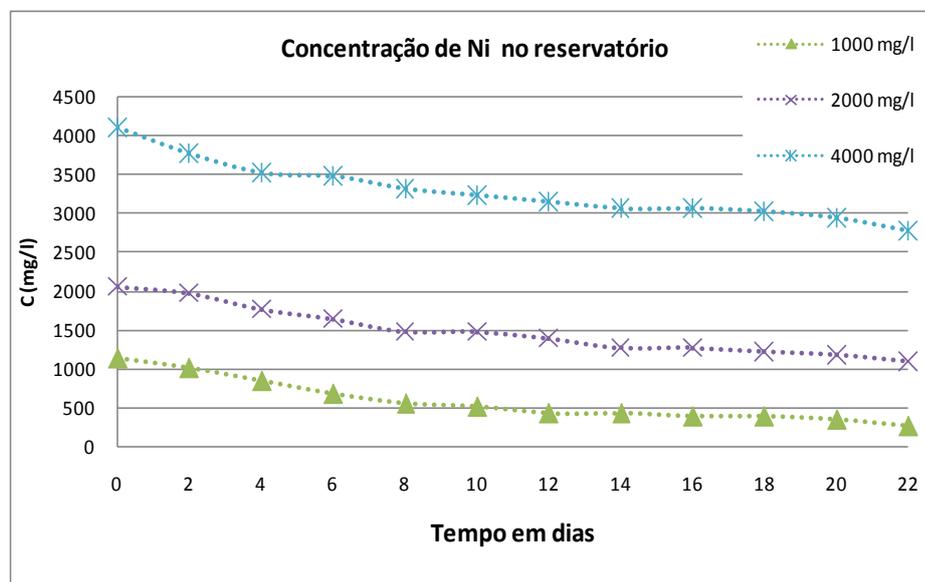


Figura 1.7 – Concentração de níquel no reservatório.

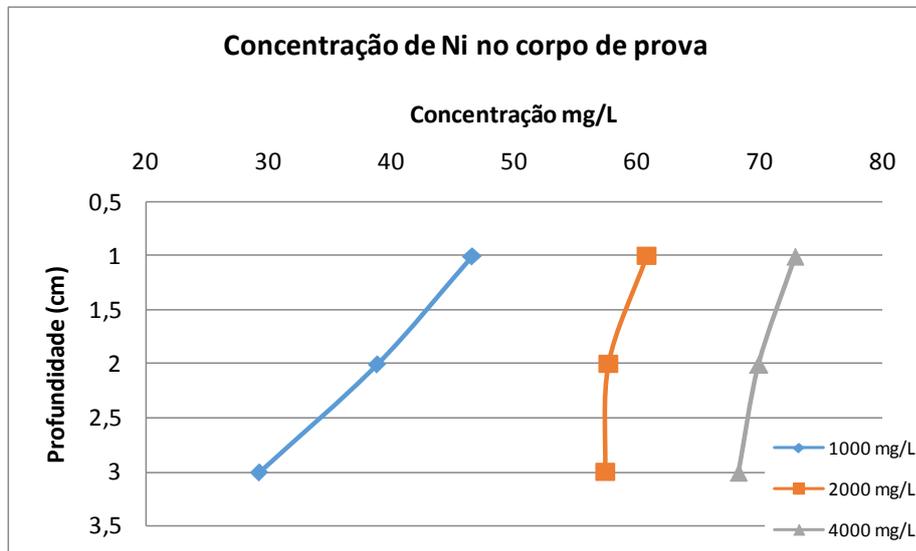


Figura 1.8 – Concentração de níquel nas camadas de solo.

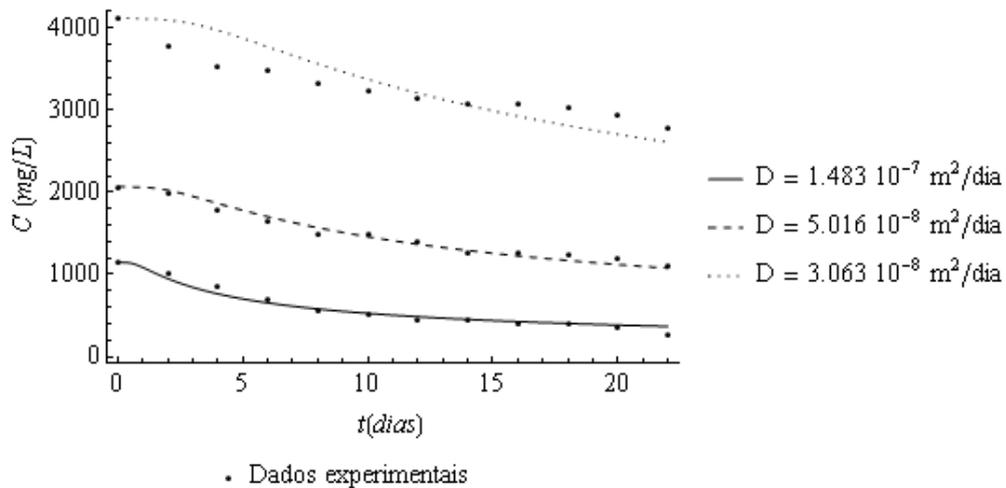


Figura 1.9 – Coeficiente de difusão para as diferentes concentrações.

O ensaio de difusão com a solução sintética de níquel apresentou os resultados conforme esperado, ou seja, os valores das concentrações diminuindo em função do tempo até atingir o valor máximo de adsorção do solo. Já em relação aos dados de difusividade observa-se que a concentração de 4000 mg/L, obteve coeficiente de difusão maior que as demais concentrações. Classificando o solo após o ensaio de difusão, de acordo com o Conama 420 de 2009, o mesmo seria classificado como classe 3, ou seja seriam os solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior que o valor de prevenção e menor ou igual ao valor de investigação. A Figuras 2.0 e 2.1 apresentam as isotermas para o efluente sintético de cromo.

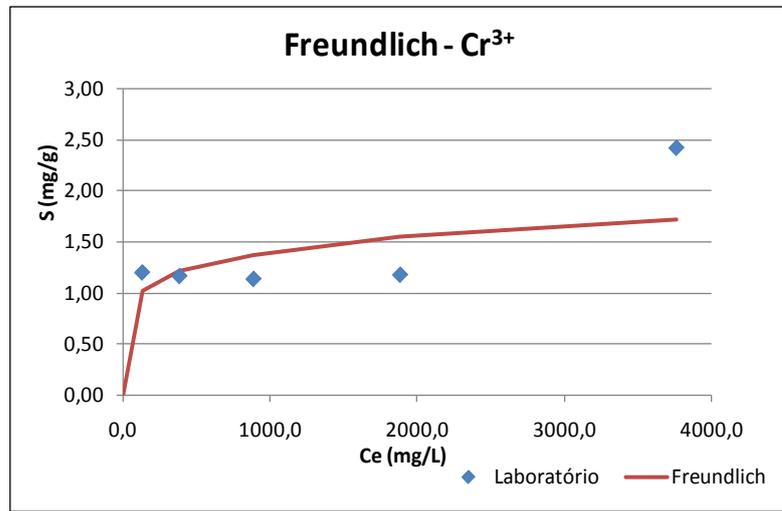


Figura 2.0 – Isoterma de Freundlich de Cr<sup>3+</sup> (sintético).

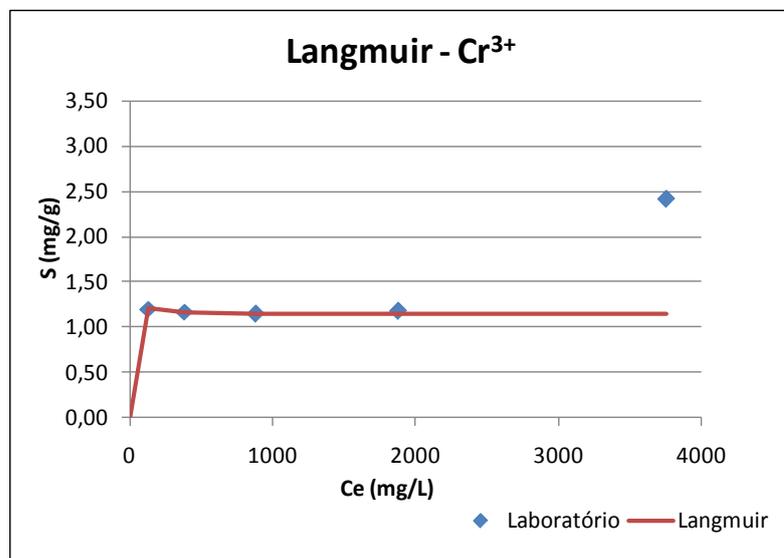


Figura 2.1 – Isoterma de Langmuir de Cr<sup>3+</sup> (sintético).

As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam os dados referente aos modelos de isotermas para contaminante com a solução sintética de níquel.

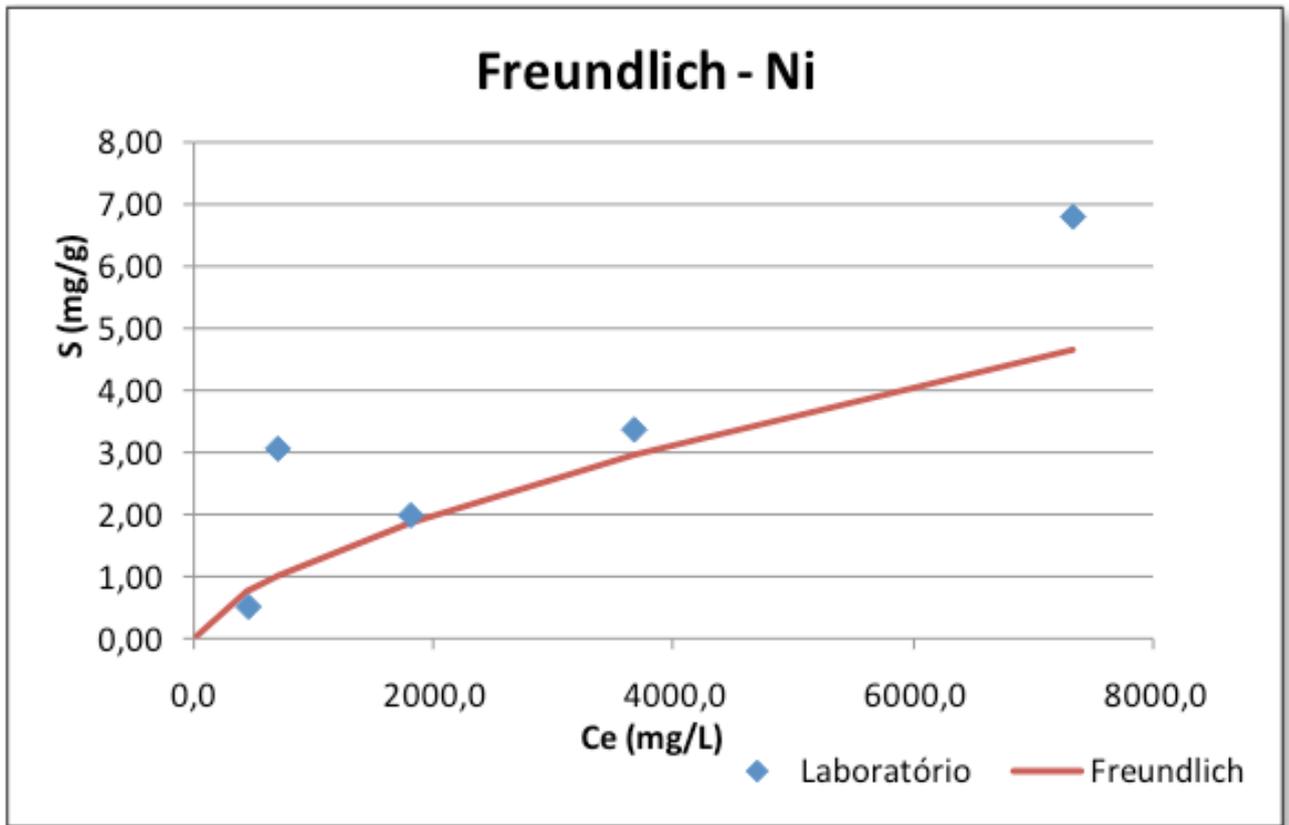


Figura 2.2 – Isotermas de Freundlich para o níquel (sintético).

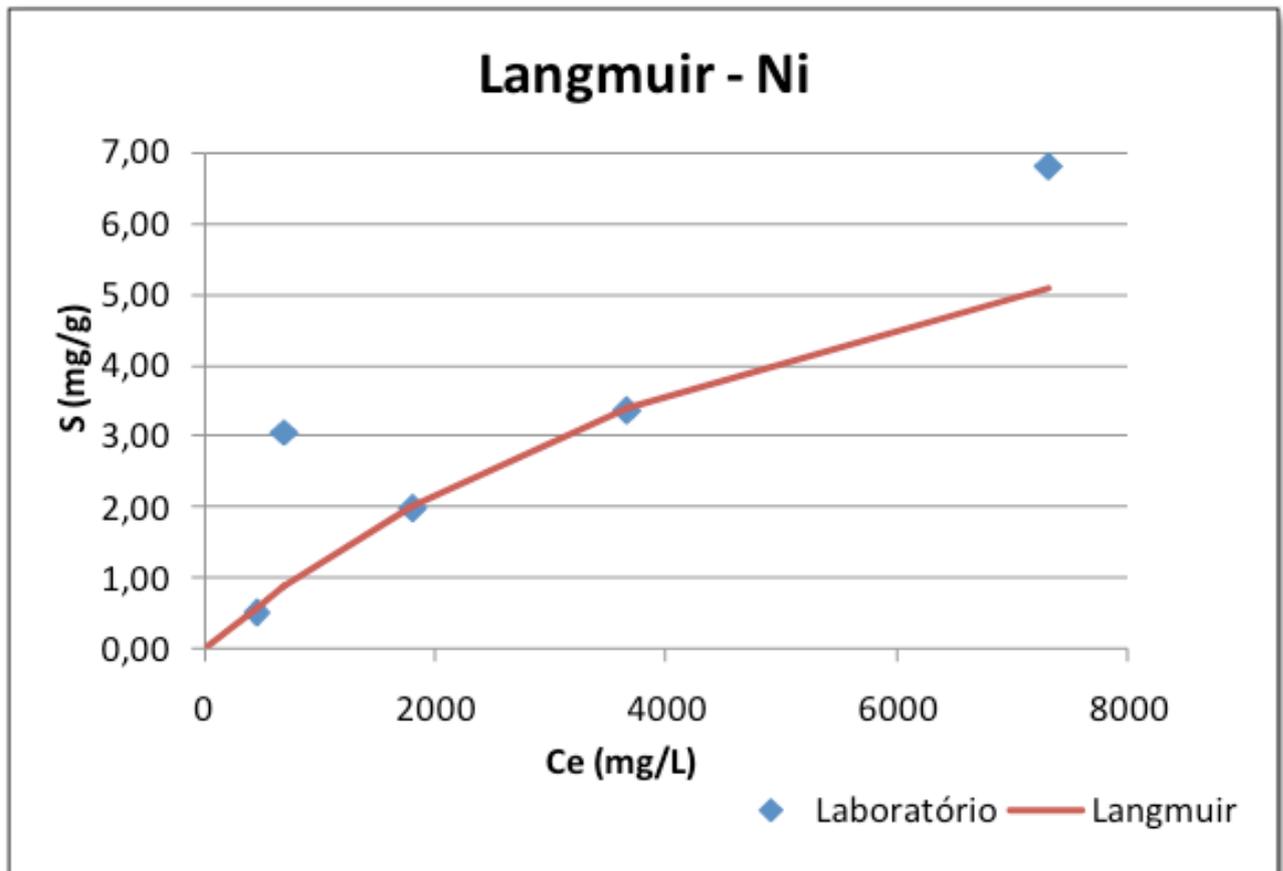


Figura 2.3 - Isotermas de Langmuir para o níquel (sintético).

As isotermas para a solução contaminante sintética Figuras 2.0, 2.1, 2.2 E 2.3 observa-se um bom ajuste para ambas isotermas. Nessas isotermas nota-se também que o ponto

de máxima concentração 4000 mg/L ficou bem distante da linearidade, e isso pode estar correlacionado a quantidade de cromo ser bem acima da capacidade de sorção do solo.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo trata-se de uma argila siltosa, quando compactado apresenta uma permeabilidade de  $4,5 \times 10^{-9}$  m/s, o que o confere como bom material para confecção de *liner* compactado. A caracterização química do solo mostrou que o mesmo possui baixa quantidade de elementos o que configura numa baixa capacidade de troca de cátions, o que poderá influenciar diretamente nos mecanismos de sorção.

O ensaio de difusão única espécie tanto para o cromo como o níquel apresentou diminuição em função do tempo de ensaio, estabilizando a sorção, no momento em que solo havia saturado a sua capacidade de absorver esses elementos;

O solo do *liner* após o ensaio de difusão com o cromo, foi classificado de acordo com a Norma Conama nº420 de 2009, em classe 4, ou seja, são solos que apresentam pelo menos uma substância química com os valores acima dos valores de investigação, sejam ele, agrícola, residencial, ou industrial. Já o ensaio de difusão com o níquel o solo foi classificado como classe 3, ou seja seriam os solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior que o valor de prevenção e menor ou igual ao valor de investigação.

Os modelos de sorção de Freundlich e Langmuir apresentaram melhor ajustes para as condições em que os elementos estavam separados em uma única espécie, fato este observando na literatura pesquisada.

#### REFERÊNCIAS

ABNT (1986). Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). NBR-6457/1986. Rio de Janeiro. RJ. 8 p.

ABNT (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. NBR-6508. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 8p.

ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica. NBR-7181. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 13 p.

ABNT (1996). Solo – Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo método sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. NBR-13602. Rio de Janeiro, RJ.5 p.

ABNT (1984). Determinação do Limite de Liquidez. NBR-6459. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 6 p.

ABNT (1986). Determinação do Limite de Plasticidade. NBR-7180. Rio de Janeiro. RJ. 3 p.

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182 (1986) - Solos - Ensaio de Compactação. 10 p.

ABNT (1997). Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. NBR-14545. Rio de Janeiro, RJ. 12 p.

AMARAL SOBRINHO, N. M. B. (1998). Mobilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. Revista brasileira de ciência do solo, v 22: 345-353.

BRASIL. Resolução nº 420 do CONAMA, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial União [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 de dez. 2009.

BOSCOV, M. E. G. (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo.

COSTA, P. O. S. (2002). Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de SAUÍPE/BA. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, 188p.

DEMUELENAERE, R. G. A. (2004). Caracterização de propriedades de transporte de metais pesados em solos residuais do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-RIO. Rio de Janeiro, RJ, 120p. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5462/5462\\_1.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5462/5462_1.PDF)>. Acesso em jan de 2020.

DNER (1994) – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME228 – Solos – Compactação em equipamento miniatura. 14 p.

DNER (1994) – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME256 - Solos – Compactação em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. 6 p.

DNER (1994) – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME258 - Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-MCV. 14 p.

GOMES, P.C. (1997). Extração fracionada de metais pesados em latossolo vermelho-amarelo. Revista brasileira de ciência do solo, v 21:543-551.

GURJÃO, C.M.C. (2005). Estimativa de Propriedades Geoambientais de Camadas Impermeabilizantes de Solos Tropicais. Tese de Doutorado em Geotecnia, Brasília, DF, 257 p. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/index.php?p=posgrad&pos=teses>>. Acesso em jan de 2020.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo, Villibor. 213p.

PICARELLI, S. (2003). Avaliação da contaminação de solos por hidrocarbonetos e metais pesados em diques de contenção. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Minerais, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 95p. Disponível em :<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3039/000380877.pdf>>. Acesso em dez de 2019.

SANEPAR (1999). Uso e manejo do lodo na agricultura . Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Curitiba, PR, 98 p. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/produtos.htm>>. Acesso em out de 2019.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campinas Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Franciele Braga Machado Tullio** Engenheira Civil (Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG/2006), Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/2009, Mestre em Ensino de Ciências e Tecnologia (Universidade Tecnológica federal do Paraná – UTFPR/2016). Trabalha como Engenheira Civil na administração pública, atuando na fiscalização e orçamento de obras públicas. Atua também como Perita Judicial em perícias de engenharia. E-mail para contato: francielebmachado@gmail.com

**Leonardo Tullio** Engenheiro Agrônomo (Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais – CESCAGE/2009), MBA em Agronegócios (Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais – CESCAGE/2011), Mestre em Agricultura Conservacionista (Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR/2016). Doutorando em Ciências do Solo na Universidade Federal do Paraná - UFPR. Membro da Equipe Multidisciplinar do NUTEAD/UEPG. Professor no Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais. E-mail para contato: leonardo.tullio@outlook.com

## ÍNDICE REMISSIVO

### B

Biopolímeros 137, 146, 147

### C

Coatings 146, 147, 148, 149, 150, 152, 153, 154, 155

Coeficiente de atrito 136, 137, 141, 144

Cogeração 50, 51, 90

Competitividade 77, 78, 81, 85, 86, 88, 94, 99

Computação verde 119

### D

Desenvolvimento sustentável 35, 36, 37, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 168

Desperdício 146, 147, 167

### E

Efluente líquido 165, 174

Energia 9, 1, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 35, 38, 39, 49, 50, 51, 52, 58, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 80, 84, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 114, 119, 167, 217, 230, 231

Expansão da geração 15, 18, 75, 76, 85

### F

FPGA 12, 118, 119, 121, 123, 124, 125, 126

### G

Galvanoplastia 165, 166, 167, 168, 175

Geração 9, 1, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 20, 24, 49, 50, 51, 60, 62, 69, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 85, 86, 87, 90, 91, 92, 167, 168, 184, 188

Gerador 1, 2, 5, 6, 9, 10, 47, 58, 76

### H

Hidrelétrica 1, 10, 79

### I

Inteligência artificial 109, 110, 113

### L

Leilões de transmissão 11, 15, 16, 17, 19, 21

Localização 12, 17, 30, 85, 87, 113, 127, 128, 127, 128, 133, 134, 171, 178, 202

### M

Manipulador-H 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108

Manutenção 6, 8, 10, 12, 21, 41, 51, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 76, 152, 158, 167, 185, 188, 189, 192  
Marcos fiduciais 127, 128, 129, 134  
Melhores práticas 77, 88, 89, 91, 100  
Mercado Livre 88, 99, 100  
Metalografia 156, 158, 159, 160  
Micromouse 109, 110, 111, 113, 166, 117  
Microscopia óptica 156  
Migração Sísmica 119  
Movelt 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108

## **N**

Nanolubrificante 136, 139, 141  
Nanopartículas de amido 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 144

## **O**

Open source 109, 110, 129  
Oportunidades 11, 13, 75, 88, 90, 95, 97, 134, 187

## **P**

PIR 35, 36, 37, 46, 47, 48  
Planejamento energético 35, 36, 38, 44, 46, 47, 48  
Project Finance 11

## **Q**

Qitosana 146, 147, 148, 149, 150, 152

## **R**

Rendimento 49, 50, 52, 53, 58, 60, 61  
Repotenciação 1, 3, 8, 9, 10  
Risco 4, 15, 51, 67, 76, 79, 86, 87, 88, 89, 92, 93, 95, 97, 99, 228  
Robótica 9, 101, 102, 103, 107, 109, 110, 111, 112, 117, 127, 128, 135  
Robótica móvel 110, 109, 128  
ROS 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 115, 116, 117, 129  
RTM 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125

## **S**

Setor elétrico 11, 13, 15, 22, 24, 29, 35, 36, 41, 45, 47, 75, 76, 77, 85, 98, 99  
Simulação 17, 25, 34, 93, 94, 95, 96, 104, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 127, 129, 130, 132, 216, 226  
Smart Grid 64, 70  
Supercapacitor 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74  
Supercomputação 119  
Sustentabilidade 9, 64, 99

## T

Taxa de desgaste 136, 139, 143, 144

Térmicas 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 96, 209, 214

Tratamento 38, 128, 158, 156, 160, 163, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 180, 229

Turbina de Tesla 49, 50, 51, 52, 60, 62

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**