

# REVISTA



**SOLUÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO PAÍS**

Atendimento:  
sodebras@sodebras.com.br  
Acesso:  
<http://www.sodebras.com.br>

## ARTIGOS PUBLICADOS

PUBLICAÇÃO MENSAL  
Nesta edição

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ELECTRONIC SYSTEM FOR THE CAPTURE OF LUNG SOUNDS BY ELECTRET AND PIEZOELECTRIC	
ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA ELETRÔNICO PARA CAPTAÇÃO DE SONS PULMONARES POR ELETRETO E POR PIEZOELÉTRICO – Henrique M. dos S. Correa; Lucas B. da Silva; Thiago G. Almeida; José E. W. Moreira; Walter A. V. Valenzuela; Victor E. Vermehren .....	05
PRE-PROCESSING TECHNIQUES FOR RESPIRATORY SOUNDS IN IA CLASSIFIERS	
TÉCNICAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO PARA SONS RESPIRATÓRIOS EM CLASSIFICADORES IA – César Augusto Menezes Nepomuceno; Moisés Pereira Bastos; João Paulo Campos Mendes; Victor Vermehren Valenzuela; Daniel Akio Chen; Vitoriano Medeiros Casas .....	20
ERASMUS+ STUDENT MOBILITY AS A TOOL FOR DEVELOPING PERSONAL SKILLS: A CASE STUDY	
MOBILIDADE ESTUDANTIL ERASMUS+ COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS PESSOAIS: UM ESTUDO DE CASO – Marjorie Sacha Pontes Eugênio; António Vitor Nunes de Carvalho .....	31
FINITE ELEMENTS: DIALOGUE BETWEEN ENGINEERING AND DENTISTRY – BIBLIOGRAPHY REVIEW	
ELEMENTOS FINITOS: DIÁLOGO ENTRE A ENGENHARIA E ODONTOLOGIA – REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA – Douglas Andrin Edmundo; Teófilo Miguel de Souza .....	44
ECONOMIC ANALYSIS OF AN EV SOLAR CHARGING SYSTEM BASED ON ENERGY CONSUMPTION ESTIMATES FOR VEHICLES USED ON PEOPLE TRANSPORTATION	
ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA SOLAR DE CARREGAMENTO VEICULAR BASEADA NA ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE PESSOAS – André Luiz Zamponi Ribeiro; Teófilo Miguel de Souza; Pedro Magalhães Sobrinho .....	56
IRRADIANCE AND TEMPERATURE ESTIMATION IN A TYPICAL PHOTOVOLTAIC SYSTEM	
ESTIMAÇÃO DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO TÍPICO – João Marcos dos Santos Souza; Cassius Zanetti Resende; Wagner Teixeira da Costa .....	70
ANALYSIS OF A WATER PUMPING SYSTEM USING A VERTICAL AXIS WIND TURBINE IN THE BRAZILIAN SCENARIO	
ANÁLISE DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA UTILIZANDO UM AEROMOTOR EÓLICO DE EIXO VERTICAL NO CENÁRIO BRASILEIRO – Andrei Testi; Teófilo Miguel de Souza .....	85
ECONOMIC ANALYSIS OF AN EV SOLAR CHARGING SYSTEM BASED ON ENERGY CONSUMPTION ESTIMATES FOR VEHICLES USED ON PEOPLE TRANSPORTATION	
ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA SOLAR DE CARREGAMENTO VEICULAR BASEADA NA ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE PESSOAS – André Luiz Zamponi Ribeiro; Teófilo Miguel de Souza; Pedro Magalhães Sobrinho .....	102

BARRIERS TO THE ADOPTION OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW	
BARREIRAS À ADOÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS ÀS EDIFICAÇÕES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA – Talita Mariane Cristino; Antonio Faria Neto; Otávio José de Oliveira; Teófilo Miguel de Souza .....	113
STUDY OF THE APPLICATION OF 3D PRINTING FOR MANUFACTURING ELECTRIC VEHICLES ESTUDO DA APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D PARA MANUFATURA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS Jonas Cardoni Neto; Teófilo Miguel de Souza .....	128
INFLUENCE OF PENTAERYTHRITOL ESTER ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ABS	
INFLUÊNCIA DO ÉSTER DE PENTAERITRITOL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ABS – Adiniele Martins de Faria; Carlos Henrique de Silva; Otavio Bianchi .....	137
THE CURRENT PANORAMA OF WIND TURBINES AVAILABLE ON THE MARKET	
O PANORAMA ATUAL DOS AEROGERADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO – Natasha Martins Rodrigues de Jesus; Rafael Soares Souza; Teófilo Miguel de Souza; Thais Santos Castro .....	149
SOLAR TRACKERS: A LITERATURE REVIEW	
RASTREADORES SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – Rafael Soares Souza; Natasha Martins Rodrigues de Jesus; Teófilo Miguel de Souza; Thais Santos Castro .....	157

## Área: Interdisciplinar

---

9-0	<p><b>COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ELECTRONIC SYSTEM FOR THE CAPTURE OF LUNG SOUNDS BY ELECTRET AND PIEZOELECTRIC</b></p> <p><b>ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA ELETRÔNICO PARA CAPTAÇÃO DE SONS PULMONARES POR ELETRETO E POR PIEZOELÉTRICO</b></p> <p>Henrique M. dos S. Correa; Lucas B. da Silva; Thiago G. Almeida; José E. W. Moreira; Walter A. V. Valenzuela; Victor E. Vermehren</p>
9-0	<p><b>PRE-PROCESSING TECHNIQUES FOR RESPIRATORY SOUNDS IN IA CLASSIFIERS</b></p> <p><b>TÉCNICAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO PARA SONS RESPIRATÓRIOS EM CLASSIFICADORES IA</b></p> <p>César Augusto Menezes Nepomuceno; Moisés Pereira Bastos; João Paulo Campos Mendes; Victor Vermehren Valenzuela; Daniel Akio Chen; Vitoriano Medeiros Casas</p>

## ***COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ELECTRONIC SYSTEM FOR THE CAPTURE OF LUNG SOUNDS BY ELECTRET AND PIEZOELECTRIC***

### ***ANÁLISE COMPARATIVA DO SISTEMA ELETRÔNICO PARA CAPTAÇÃO DE SONS PULMONARES POR ELETRETO E POR PIEZOELÉTRICO***

Henrique M. dos S. Correa<sup>1</sup>  
Lucas B. da Silva<sup>2</sup>  
Thiago G. Almeida<sup>3</sup>  
José E. W. Moreira<sup>4</sup>  
Walter A. V. Valenzuela<sup>5</sup>  
Victor E. Vermehren<sup>6</sup>

***Resumo – A auscultação dos sons pulmonares é uma técnica frequentemente utilizada na medicina para diagnóstico de doenças ou distúrbios no sistema respiratório. O estetoscópio convencional é o instrumento empregado para auscultação e seu uso adequado requer prática e experiência por parte do profissional da saúde. Com o avanço da engenharia biomédica, possibilitou-se o desenvolvimento dos estetoscópios digitais, que permitem amplificar e filtrar de forma adequada o sinal. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema eletrônico para captação de sons os quais serão captados, analisados e comparados por meio de dois tipos de sensores de ausculta. Circuitos de aquisição, amplificação, reconstrução e condicionamento de sinais, filtros analógico e digital, foram implementados visando a identificação de correta dos sons. Os resultados obtidos fornecem um claro cenário das vantagens e desvantagens entre a utilização dos sensores.***

***Palavras-chave: Pastilha piezoelétrica. Eletreto. Ausculta pulmonar. Sons respiratórios. Processamento digital de sinais.***

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA. Contato: [hmsc.eai18@uea.edu.br](mailto:hmsc.eai18@uea.edu.br);

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Contato: [lbs.eng18@uea.edu.br](mailto:lbs.eng18@uea.edu.br);

<sup>3</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA. Contato: [tga.eng@uea.edu.br](mailto:tga.eng@uea.edu.br);

<sup>4</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA. Contato: [jmoreira@uea.edu.br](mailto:jmoreira@uea.edu.br);

<sup>5</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA. Contato: [wvalenzuela@uea.edu.br](mailto:wvalenzuela@uea.edu.br);

<sup>6</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA. Contato: [vvalenzuela@uea.edu.br](mailto:vvalenzuela@uea.edu.br).

*Abstract - The auscultation of lung sounds is a technique frequently used in medicine for the diagnosis of diseases or disorders on the respiratory system. The conventional stethoscope is an instrument used for auscultation and its proper use requires practice and experience. This article presents the development of an electronic system for recording sounds coming from pulmonary auscultation, which is going to be recorded, analyzed and compared, through two types of auscultation. Signal acquisition and conditioning circuits, analog and digital filters, amplification circuits and signal reconstruction circuits were implemented with the aim of facilitating the identification of any disorders. The results obtained are presented and discussed, providing a clear scenario of the advantages and disadvantages between the use of electret and PZT sensors.*

**Keywords:** Piezoelectric tablet. Electret. Pulmonary auscultation. Lung sounds. Digital signal processing.

## I. INTRODUÇÃO

A avaliação da função respiratória é uma das habilidades mais importantes durante o exame físico do paciente, fatores como infecções, sobrecarga hídrica e imobilidade podem influenciar nos sons respiratórios. A avaliação física inclui a ausculta pulmonar, que avalia o movimento de ar através da árvore traqueobrônquica e consiste no ato de escutar os ruídos internos do organismo, e perceber alguma anomalia.

Na prática clínica ocorrem algumas dificuldades de diagnóstico, normalmente associadas a baixa qualidade com que os sons pulmonares chegam aos ouvidos do examinador. Este problema torna-se ainda mais crítico na ausculta de certos sons adventícios, que possuem componentes de frequência relevantes acima de 2 kHz e que são atenuados pelos tecidos biológicos. Essa limitação tem sido objeto de estudo de diversos grupos de pesquisa na tentativa de desenvolver técnicas e sensores adequados para a aquisição de sons que permitam um melhor diagnóstico (EARIS, CHEETHAM, 2000).

A ferramenta mais utilizada clinicamente para a ausculta de sons corporais é o estetoscópio. Um estetoscópio convencional (mecânico) é constituído por peças auriculares, tubos binaurais, tubo de condução flexível, campânula e diafragma (GARCIA, 2002). Apesar de sua simplicidade, o uso deste para diagnóstico requer bastante prática e experiência por parte do profissional responsável (HAIBIN et al., 2009).

Atualmente, com o avanço da engenharia biomédica, várias técnicas de processamento digital de sinais são aplicadas à medicina, principalmente aquelas voltadas à aquisição e análise de sinais biológicos (IGARASHI, 2007). Estas técnicas possibilitaram o desenvolvimento dos estetoscópios digitais, que permitem amplificar e filtrar de forma adequada o sinal referente aos sons corporais, facilitando a identificação de eventuais distúrbios, sejam estes pulmonares, cardíacos ou gastrointestinais (HAIBIN et al., 2009; LOUZADA, 2009).

No presente trabalho é desenvolvido um sistema eletrônico com informação digital, formado por circuitos analógicos e um sistema embarcado para adquirir e tratar digitalmente os sinais sonoros captados por sensores de eletreto ou piezoelétrico (PZT),

resultando em uma comparação entre os dois sensores. Filtros analógico e digital foram implementados para os sinais pulmonares. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no final deste trabalho.

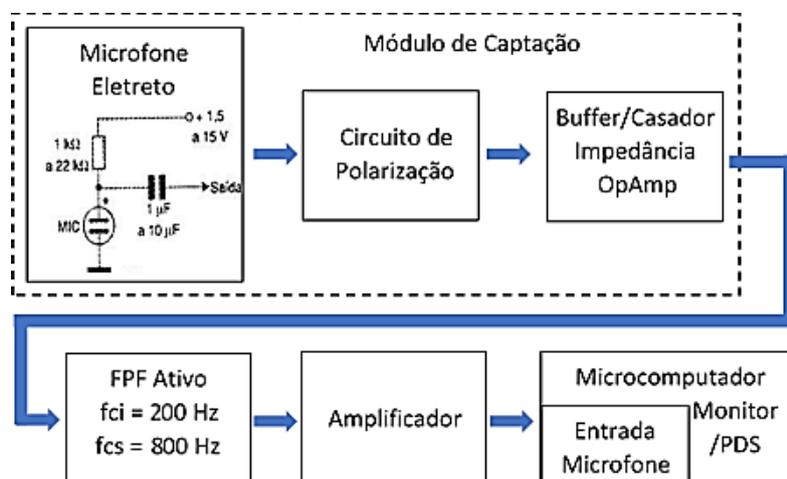
## II. METODOLOGIA

### 2.1 – Materiais e diferenças entre os sistemas de captação

Foram desenvolvidos dois sistemas de captação de sons com o objetivo de realizar a ausculta pulmonar utilizando dois sensores amplamente empregados no uso da aquisição de sons cardíacos como em Prasanga (2011), Leng et al. (2015) e Haoran et al. (2018). O primeiro sensor é baseado em um microfone de eletreto enquanto o segundo, é fundamentado em uma pastilha piezoelétrica. Os sensores foram posicionados internamente nas campânulas de estetoscópios analógicos e a conexão entre cada sensor e o circuito para tratamento inicial foi realizada por meio de um cabo blindado.

O diagrama funcional do auscultador pulmonar projetado e desenvolvido, tem apenas diferença nos módulos de ausculta, mas após o *buffer*, os sistemas são idênticos, conforme pode ser observado nas Figuras 1 e 2.

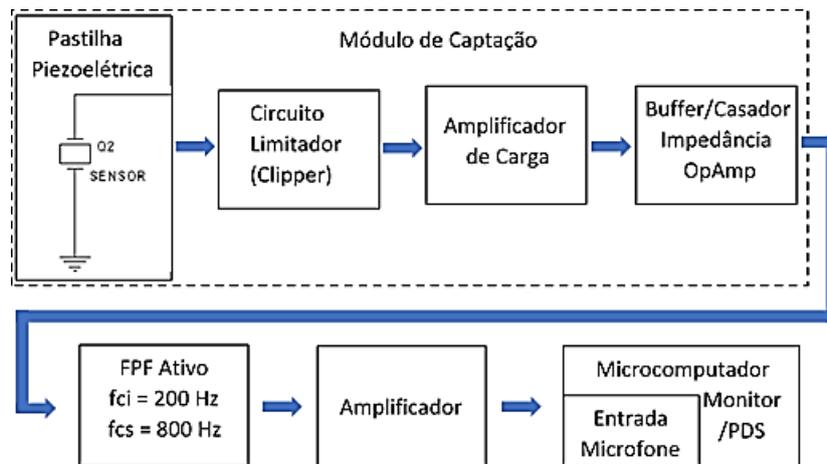
Figura 1 – Diagrama funcional para o auscultador pulmonar com microfone de eletreto para a entrada do sinal de áudio.



Fonte: Autores, 2021.

A instalação dos sensores nas campânulas foi adequada a configuração física de cada sensores. A campânula utilizada para o eletreto deve manter pelo menos 3 mm de distância entre sua parede e o diafragma, devido à espessura do sensor de eletreto. Já o sensor piezoelétrico, apresentava uma espessura menor, pois tem formato de disco e requer pouco espaço para sua fixação. Ressalta-se que as respostas em frequência das campânulas eram semelhantes.

Figura 2 – Diagrama funcional para o auscultador pulmonar com pastilha piezoelétrica para a entrada do sinal de áudio.



Fonte: Autores, 2021.

## 2.2 – Módulo de ausculta com sensor de eletreto

O sensor de eletreto é um microfone capacitivo que possui um pequeno orifício para a passagem do som. Sendo assim, as vibrações alcançam uma fina camada de Millar, carregada positivamente em relação à carcaça do componente. A outra placa é fixa, sendo que o movimento relativo altera o valor das cargas e isso gera uma corrente, dando origem a um sinal proporcional às variações mecânicas, no caso, o som. Utilizou-se o sensor de eletreto modelo CMC-5044PF-A, e o sensor PZT de 35 mm, modelo 7BB-35-3. Estes tipos de sensores são os mais utilizados para realização de auscultas do corpo humano, como abordado por Padilla-Ortiz e Ibarra (2018).

O sistema com o eletreto foi composto pelo sensor posicionado na campânula, circuito de polarização, *buffer*, filtro e amplificador, sendo sua saída destinada a um computador por meio da entrada de áudio, conforme a Figura 1.

Por fim, esse capacitor é ligado internamente a um transistor de efeito de campo, JFET, que amplifica esse sinal e fornece alta impedância de entrada.

Devido à presença do JFET, o sensor de eletreto precisa de polarização com tensão DC. Apesar de referências como Prasanga (2011), Kaniusas (2007), Oliveira e Marques (2014), e Valenga (2009), fixarem o sensor em outra posição do que esta proposta, verificou-se que internamente o eletreto fica melhor fixado e reduz os efeitos das trepidações da mão do usuário, no momento da ausculta.

## 2.3 – Módulo de ausculta com sensor de pastilha piezoelétrica

O módulo de ausculta com PZT tem como sensor um disco piezoelétrico, que converte as vibrações do tecido externo do corpo produzidas pelo pulmão em sinais elétricos. Com intuito de reduzir os ruídos ocasionados por artefatos de movimento (ZANARTU et al., 2008), utilizou-se a pastilha do sensor fixada em um estetoscópio convencional, tornando o manuseio prático para uso clínico.

O sensor piezoelétrico, também foi fixado na campânula, circuito limitador de nível, amplificador de carga, *buffer*, filtro e amplificador, também com saída atribuída à entrada de áudio do computador, conforme Figura 2.

O funcionamento do PZT é por meio da conversão de força aplicada em sinais elétricos, como uma fonte de carga (ACER et al., 2015). Essa força é uma relação direta da variação de pressão produzida pelas ondas sonoras desde o pulmão ao tecido externo. Por isso, modela-se o sensor como uma fonte de corrente, da mesma maneira que em Kester (2005) e Yilmaz et al. (2020). O fato do PZT ser uma fonte de carga reforça a necessidade de isolar a entrada de cargas externas, portanto este sensor foi conectado ao circuito de captação por meio de um condutor de cobre revestido por Nylon, com uso de uma malha externa, para a blindagem. Também se utiliza um arranjo de amplificadores operacionais em um circuito integrador com uma alta impedância de entrada, chamado amplificador de carga, que isola as cargas externas e integra a corrente de entrada em uma tensão de saída. A partir da equação (1) tem-se que a tensão de saída  $V_o$  torna-se proporcional à relação entre a carga  $Q$  gerada pelo sensor e o capacitor de realimentação  $C_f$  do circuito operacional integrador.

$$V_o = \frac{1}{C_f} \int -I dt = -\frac{Q}{C_f} \quad (1)$$

Desta forma, a tensão de saída não é uma simples amplificação da tensão de entrada, mas relacionada diretamente às vibrações mecânicas, sendo possível o tratamento adequado do sinal nas etapas subsequentes, caso não seja utilizado este circuito, o sinal amplificado seria uma distorção do real sinal captado como aponta Zhen-gu (2019), e seu nível seria reduzido como em Liu et al. (2007).

#### 2.4 – Circuitos eletrônicos e processamento digital

Observa-se que no processo de captação, percebeu-se que os sons pulmonares normais e adventícios estão distribuídos entre 20 Hz e 2 kHz. Contudo, aplicando uma ênfase entre 200 Hz e 800 Hz é possível evidenciar o som do pulmão em relação aos sons cardíacos, os quais são alvo da maioria dos estetoscópios eletrônicos (LENG et al., 2015). Os materiais de pesquisa em geral apresentam conclusões diferentes para a faixa de frequência dos sons pulmonares como em Haoran et al. (2018), Zanartu et al. (2008), e Yilmaz (2020), uma vez que esta possui uma intensidade menor em relação aos sons cardíacos.

Cada sistema de ausculta projetado incluiu um filtro seletivo do tipo passa-faixa entre as frequências de 200 Hz a 800 Hz destinado à atenuação dos sons cardíacos, de baixa frequência, e sons de alta frequência como voz e outros. O filtro foi desenvolvido utilizando dois estágios em cascata, primeiramente um passa-alta Butterworth de segunda ordem, sem ganho de tensão, com frequência de corte sintonizada em 200 Hz, usando o amplificador operacional TL072CP e um passa-baixa Butterworth de primeira ordem com ganho de tensão igual a 20 vezes e frequência de corte em 800 Hz também usando o

mesmo componente. O último estágio do circuito físico é a amplificação, sendo projetado com o CI LM386, o qual exige poucos componentes externos, e neste protótipo utilizou-se uma configuração de ganho 20. Isto resultou em uma saída para fone de ouvido, que serviu como referência de ausculta durante as gravações.

A alimentação utilizada foi realizada por uma bateria alcalina não recarregável de 9 V, utilizou-se um circuito com o amplificador operacional LM741 para se obter uma fonte simétrica a partir de uma fonte simples. O sentido de formar uma fonte simétrica é atribuído ao correto funcionamento dos amplificadores operacionais presentes no circuito, enquanto a utilização da bateria foi para evitar a inserção de ruídos provenientes da rede elétrica da concessionária.

Para o processamento digital dos sinais captados foram aplicados os seguintes parâmetros: 10 leituras por indivíduo com 16 segundos de duração cada, 8 mil amostras por segundo, sendo que cada amostra foi composta por 16 bits e o sinal normalizado em 1 V de pico, armazenados em um arquivo no formato WAV. As auscultas foram conduzidas em um ambiente silencioso, para garantir a padronização de condições entre cada leitura. Os arquivos de áudio gerados pelo protótipo foram gravados com o auxílio de um cabo P3 e um *notebook*. O programa escolhido para gravação foi o Audacity, um *software* livre que permite algumas configurações nos arquivos exportados, como o padrão de arquivos que foi utilizado, para fornecer as mesmas condições para as diversas leituras realizadas.

Utilizou-se o aplicativo Matlab<sup>TM</sup>, toolbox PDS, para análise dos áudios obtidos, procurando por diferenças entre cada arquivo de áudio e entre cada tecnologia empregada nos protótipos. As técnicas empregadas no Matlab consistiam em: filtragem digital através da janela de Blackman na faixa de 50 Hz a 1000 Hz, utilização de um algoritmo para reduzir *Outliers*, pelo critério 4-sigma, além de normalização do sinal processado, visualização do sinal no tempo, análise do espectro de frequência, zoom para piso de ruído e visualização do espectrograma dos sinais captados em duas e três dimensões. Todas essas técnicas foram utilizadas para a comparação.

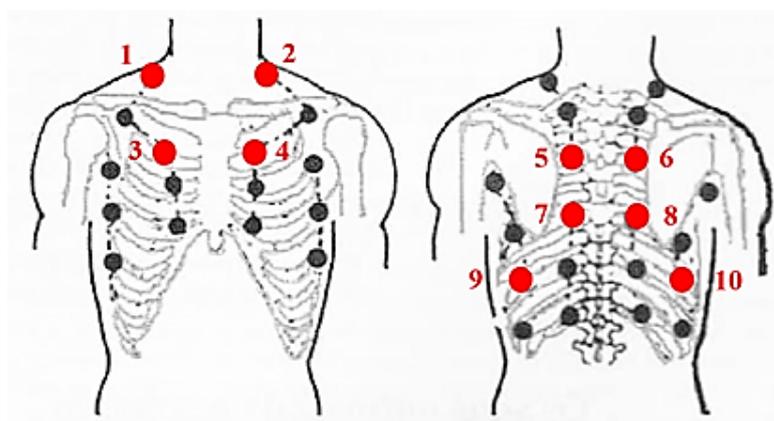
## 2.5 – Caracterização de sons pulmonares

O método para a comparação e análise entre as duas formas de captação de sons pulmonares, deu-se por meio de um estudo sobre os pontos de ausculta e regiões de ausculta, definido por Kaniusas (2007). São quatro tipos de sons normais pulmonares: sons traqueais, sons brônquicos, sons broncovesiculares e sons vesiculares, que correspondem a quatro regiões distintas onde se devem encontrar esses sons.

A detecção de alguma anomalia nos sons pulmonares é chamada de ruído adventício e pode ser auscultada em qualquer uma dessas regiões, sendo indicativo de alguma enfermidade comprovada por meio de outros exames (OLIVEIRA e MARQUES, 2014). Esse é um ponto, o outro que o pneumologista usa para informar o pré-diagnóstico é o aparecimento de determinado som normal fora da sua região, nas outras regiões de sons normais. A última forma de se informar esse pré-diagnóstico é não auscultando o som normal referente àquela região, significando uma obstrução.

Apesar dessas regiões serem distribuídas por todo o pulmão, na parte posterior do corpo e na parte anterior, são delimitados 36 pontos gerais de ausculta (GARCIA, 2002). Entretanto, a análise não foi realizada nos 36 pontos, pois segundo Valenga (2009), 9 principais pontos de ausculta são suficientes para que os pneumologistas obtenham dados prospectivos da patologia de maneira geral. Para esta pesquisa foram adotados e executados 10 pontos de ausculta. Adicionou-se um ponto a mais devido ao método de comparação entre os dois pulmões, onde se realiza a ausculta em um lado do pulmão e logo em seguida no outro, no ponto simétrico correspondente. Esses pontos foram delimitados em Valenga (2009), com o acréscimo do ponto 2, e são ilustrados na Figura 3. Na Figura 3, também é possível observar os 36 pontos gerais de ausculta, porém, em destaque, estão os 10 pontos utilizados para a comparação.

Figura 3 – Pontos de Ausculta para realização da comparação entre sistemas de captação.



Fonte: GARCIA, 2002.

Observa-se que, de acordo com Kaniusas (2007), pode-se classificar os pontos: 1, 2 como traqueal; pontos 3, 4, 5, 6 como brônquicos; pontos 7, 8 como broncovesiculares; e pontos 9, 10 como vesiculares.

## 2.6 – Métodos e procedimentos para comparação

Para a comparação, foi gravado 10 pontos para cada um dos indivíduos no mesmo dia. A comparação é válida para indivíduos de 18 a 25 anos, com pulmões saudáveis e sem histórico de doenças pulmonares nos últimos 6 meses.

O procedimento foi conduzido da seguinte forma:

1 - A gravação por meio do sistema de piezoelétrico de um ponto no peito do indivíduo, sentado, respirando normalmente de boca fechada.

2 - Logo em seguida, o mesmo procedimento era realizado para o mesmo ponto com o sistema com eletreto.

Assim, o indivíduo não se cansava de uma respiração para outra e era possível manter o mesmo nível de respiração para cada ponto. O tempo de gravação de cada ponto ficou em torno de 16 segundos, devido a uma respiração média durar cerca de 4 segundos. O objetivo foi obter 4 respirações para as análises, isto é, quatro inspirações e expirações.

Após a captura de todos os pontos dos indivíduos, cada ponto foi analisado isoladamente. Os critérios de análise foram: espectro e nível dos sinais captados, ruídos encontrados, polarização do sensor, construção mecânica dos elementos de captura, posicionamento do sensor, complexidade e manuseio dos módulos de ausculta. O experimento foi realizado 10 vezes, para cada sistema e indivíduo, e os resultados obtidos foram semelhantes, sem desvios significativos.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 – Espectro dos sinais captados

O módulo baseado no eletreto capta mais intensamente a região espectral entre 200 Hz e 400 Hz, enquanto o piezoelétrico apresenta menores níveis de captação para essa faixa. Entretanto, após 400 Hz, o eletreto mostra uma queda acentuada. Isto é, o piezoelétrico capta de forma mais plana a faixa de interesse, enquanto o eletreto é mais seletivo às baixas frequências. A causa disso pode estar relacionada à atenuação das altas frequências pela caixa torácica e pela redução dos sons do corpo humano durante sua propagação no ar, como é demonstrado em Kraman (2006).

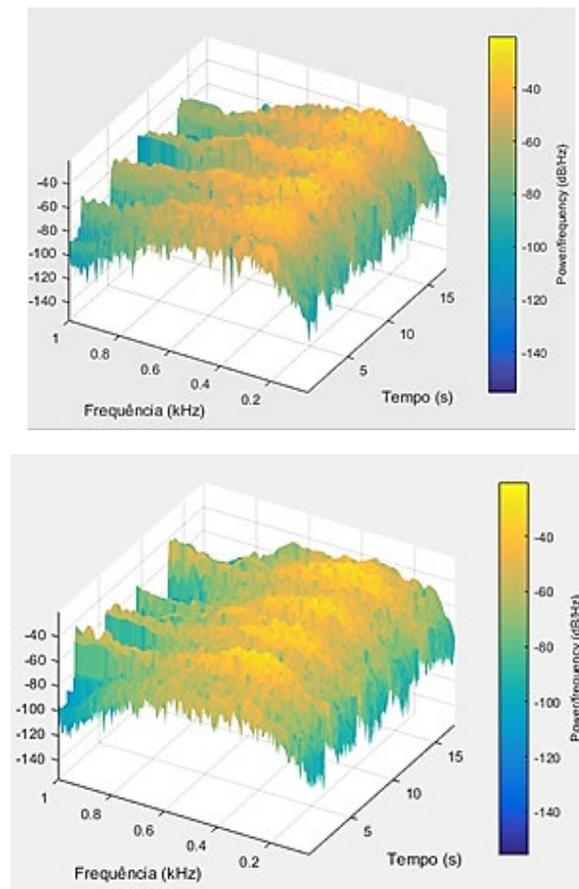
Nas captações dos sons pulmonares, o sensor PZT apresentou resposta espectral até em torno de 720 Hz, algo que não foi possível observar com o sensor de eletreto, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios usados na análise comparativa

It	PZT	Eletreto
3.1	Plano na região de interesse até 600 Hz	Mais seletivo para as baixas frequências (200 Hz a 400 Hz)
3.2	Inferior: pico -35,27 dB	Mais elevado: pico -32,70 dB
3.3	Ruído de contato, ruído de 60 Hz e rádio AM	Ruído de 60 Hz
3.4	Não necessita	Requer polarização
3.5	Requer usar um anel de 3 mm para a fixação	Requer usar um anel de 5 mm de para a fixação
3.6	Fixado entre o diafragma e a campânula	Fixado entre o diafragma e a campânula
3.7	Mais componentes Amplificador de carga	Menos componentes
3.8	Certo cuidado no manuseio, especialmente ao contato	Não foi constatado problema ao contato

Fonte: Autores, 2021.

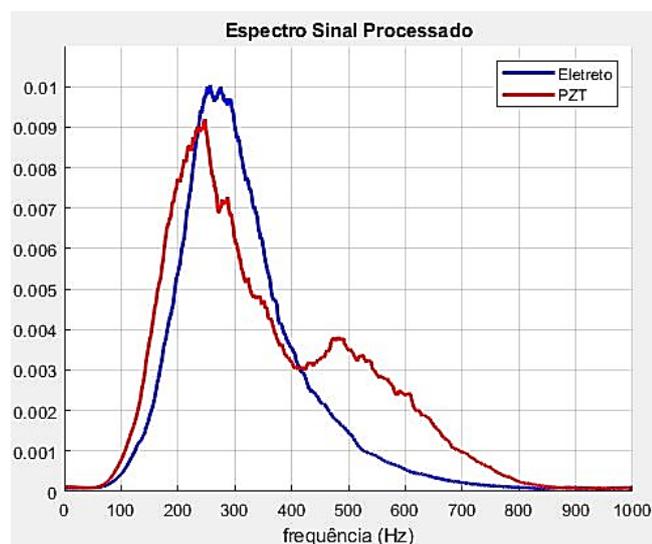
Figura 4 – Espectrogramas do ponto 5 de ausculta. Sistemas com: (a) eletreto e (b) piezoelétrico.



Fonte: Autores, 2021.

Já a análise de espectro, apresentada na Figura 5, no ponto 3, evidencia que o sistema constituído pela pastilha piezoelétrica apresenta uma resposta em frequência mais ampla comparada com o sistema baseado no sensor de eletreto.

Figura 5 – Comparação entre os espectros do ponto 3 de ausculta. Sistemas com eletreto e PZT



Fonte: Autores, 2021.

### *3.2 – Nível dos sinais captados*

O nível do sinal captado a partir do módulo no microfone de eletreto mostrou-se mais elevado que o do PZT. No entanto, observando-se as recomendações dos manuais dos estetoscópios, notou-se que há relação entre a intensidade da pressão do estetoscópio contra a caixa torácica e o nível dos sinais captados. De qualquer forma, devido ao módulo com PZT possuir o amplificador de carga, a diferença de nível pode não é um problema, visto que é possível ajustá-lo com este amplificador.

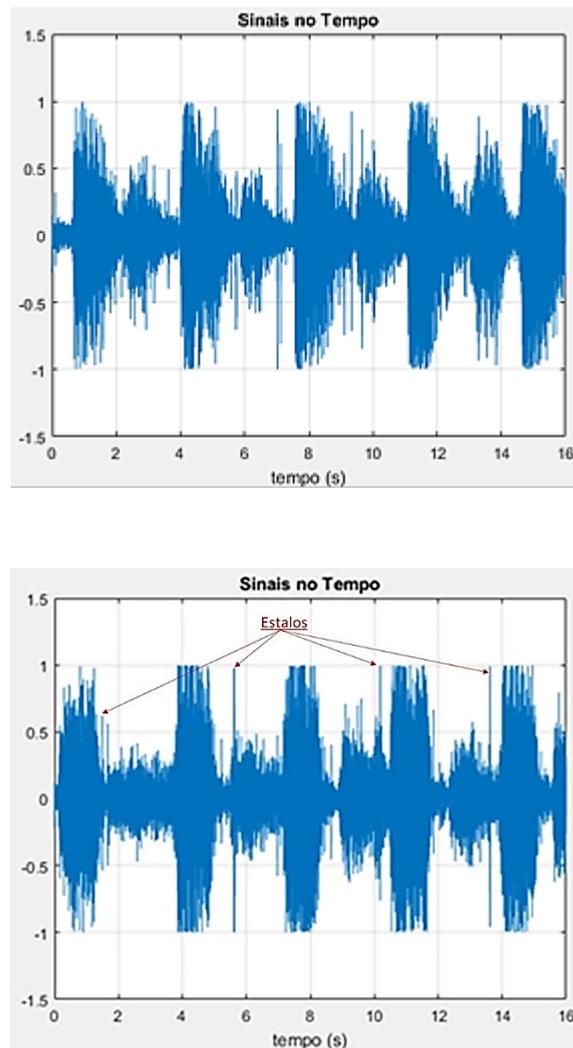
### *3.3 – Ruídos encontrados*

Para as considerações relacionadas a ruído, foram utilizadas análises com janelamento de Dirichlet, objetivando verificar o sinal completo na faixa de 50 Hz a 1 kHz, sem suavização dos próprios ruídos.

Para o módulo de captação com base na pastilha piezoelétrica foram observados três tipos de ruídos durante o processo de captura: os de contato, o ruído de interferência da frequência de 60 Hz e interferências de ondas de rádio entre 2 kHz e 3 kHz, com o sensor atuando como antena. Contudo, esse último é de baixa intensidade, sendo possível verificar apenas em algumas gravações ao fundo do sinal, e é totalmente eliminada quando se acrescenta o processamento digital posterior. Os ruídos de contato estão relacionados ao manuseio do estetoscópio pelo profissional da saúde. Esses ocorrem quando a região de contato do diafragma, durante uma respiração, perde o contato total, ora devido ao movimento do corpo do paciente ora devido ao movimento da mão do clínico durante o processo de ausculta. Neste quesito, o sensor piezoelétrico apresentou maior interferência em relação ao microfone de eletreto, principalmente em regiões dos pacientes com mais pelos.

Para o eletreto, o ruído que também ocorreu foi o de interferência da frequência de 60 Hz da rede elétrica. Estava presente sempre que a carcaça do eletreto entrava em contato com a parte metálica da campânula ou se o diafragma sofresse uma deformação elevada e entrasse em contato com o sensor, demonstrando a necessidade de um afastamento sem comprometer a passagem do som até o sensor. As imagens das Figura 5 e Figura 6, referentes ao eletreto (a), ilustram sua análise na frequência e no tempo, utilizando-se um extensor, evitando contato entre eletreto e diafragma, e conseqüentemente, eliminando o ruído de 60 Hz.

Figura 6 – Sinais no tempo da ausculta do ponto 3. Sistemas com (a) eletreto e (b) piezoelétrico



Fonte: Autores, 2021.

### 3.4 – Polarização do Sensor

Para o eletreto, é necessário efetuar a polarização adequada do sensor, uma vez que este possui em sua constituição um transistor de efeito de campo destinado à pré-amplificação do sinal de entrada e ajustes de sua impedância. Já para o sensor piezoelétrico, não é o necessário qualquer circuito de polarização, pois este converte mecanicamente as vibrações sonoras em sinais elétricos.

### 3.5 – Construção mecânica dos elementos de captura

Na construção mecânica do módulo de captação com PZT foi aplicado uma camada de silicone ao redor da pastilha, pois como consta no estudo de Acer et al. (2015), a camada de silicone traz como benefícios a distribuição da pressão aplicada tanto para dispersão de impactos diretos redirecionando forças de cisalhamento, como para adaptar-se ao contato de diferentes superfícies, além de adicionar uma característica de

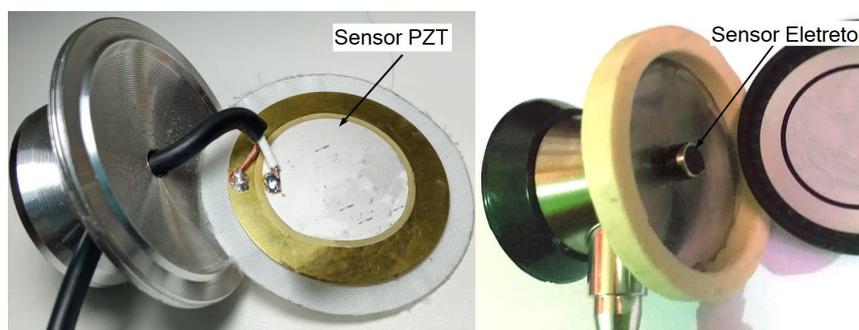
amortecimento a modelagem, proporcional à espessura desta camada. O silicone envolveu os lados e a parte superior do sensor, em uma espessura de 3 mm com um diâmetro total de 40 mm. Esta configuração diminuiu a sensibilidade da captação e reduziu o impacto direto do movimento sobre a pastilha, proporcionando melhoria da qualidade das auscultas.

O sistema com eletreto também teve que ser fixado de maneira especial, devido a campânula ser de metal, o eletreto não poderia entrar em contato diretamente com esta. Assim, utilizou-se um envoltório de borracha no eletreto para evitar o contato direto, além da utilização de um extensor de 5 mm, objetivando aumentar a distância entre a campânula e o diafragma.

### 3.6 – Posicionamento do Sensor

Os sensores foram fixados entre o diafragma e a campânula, conforme ilustrado na Figura 7, obedecendo às distâncias requeridas para o adequado funcionamento, visando maximizar o sinal captado e minimizar o nível de ruído introduzido. Ambos os sensores, após a passagem do fio, foram soldados a cabos blindados, logo na saída da campânula para serem conectados ao circuito de captação.

Figura 7 – Elementos de captação dos sinais das auscultas.



Fonte: Autores, 2021.

### 3.7 – Complexidade

Para o eletreto não foi necessária a introdução de um circuito de amplificação de carga externo, pois o próprio sensor já realiza a pré-amplificação por meio de um transistor interno, enquanto que, para o módulo constituído pelo piezoelétrico, exigiu-se a presença de um circuito para efetuar esta tarefa, elevando, assim, sua complexidade. Mesmo que o eletreto exija polarização para seu pleno funcionamento, esta constitui-se em uma malha com complexidade bem mais baixa que a de um amplificador de carga, demandado pelo PZT.

### 3.8 – *Manuseio*

O módulo com PZT exige um manuseio de forma mais cautelosa, pois durante as auscultas, os movimentos das mãos do profissional podem gerar estalos e trepidações nas captações, conforme se observa na Figura 6. Também, considerou-se que os ruídos estão relacionados à intensidade da força aplicada sobre a campânula, problema registrado por Hu e Xu (2012). Assim, a intensidade da aplicação da força durante o contato é um fator que também influencia no aparecimento de ruídos, pois o PZT é muito sensível às movimentações mecânicas, mesmo sendo atenuadas com a introdução de um diafragma de silicone aumentando o isolamento e amortecimento das vibrações. Isso proporciona melhoria da qualidade das auscultas, intervenção apontada inclusive, em outros trabalhos como os de Zanartu et al. (2008) e Acer et al. (2015).

Na Figura 6, nota-se a presença de estalos devido ao manuseio, esses estalos são ocasionados pelos movimentos da mão do profissional ao segurar o módulo de ausculta, principalmente nas expirações.

Quanto ao módulo com eletreto, os ruídos de contato também ocasionam trepidações e estalos, porém, em escala menor que a do PZT. O principal problema do manuseio envolve a presença do ruído de 60 Hz para o eletreto sem o uso de um extensor. Devido ao fato deste sensor ser conectado internamente a sua carcaça, um aterramento deste componente aumenta este tipo de ruído, e isso ocorre, pois, ao ser aplicada uma força excessiva ao ponto do diafragma se deformar, este pode entrar em contato com o sensor e causar seu aterramento, provocando o surgimento do ruído de 60 Hz e de seus harmônicos.

A Tabela 1 resume a análise comparativa efetuada pelos critérios utilizados para avaliar o sistema eletrônico para captação de sons pulmonares por eletreto e por piezoelétrico.

## IV. CONCLUSÃO

Foram desenvolvidos os circuitos de aquisição e condicionamento de sinal, filtros analógico e digital, circuitos de amplificação e circuito de reconstrução de sinal, que propiciaram a análise comparativa entre os dois módulos de captação pulmonar. A escolha de um sensor para se realizar auscultas pulmonares depende, principalmente, das condições de manuseio e da faixa de frequência do sinal captado. Ambos os sistemas discutidos apresentaram resultados distintos para estes critérios.

A utilização do auscultador com PZT apresentou-se melhor para a faixa de 200 Hz a 600 Hz que possui uma captação mais intensa, porém com maior sensibilidade às trepidações. Em contraste, o auscultador com eletreto aplica-se para a faixa de captura entre 200 Hz e 400 Hz, com uma sensibilidade menor a ruídos de trepidação.

Sendo essa a maior diferença mesmo com as diferenças estruturais, obteve-se êxito na construção dos dois auscultadores. Os sinais de áudio obtidos são muito semelhantes no que se refere à inteligibilidade. Assim, o critério de decisão sobre qual sensor utilizar para auscultas pulmonares fica apenas na faixa de frequência captada. Portanto, dependendo da aplicação da ausculta, pode-se escolher entre ambos. O mais

interessante deste equipamento é que ele capta mesmo os ruídos mais sensíveis como pequenos sopros pulmonares, ou outros sons que não são identificados pelo médico.

Ambos auscultadores possuem vantagem na captação de sons pulmonares em comparação com os estetoscópios analógicos, pois estes dependem da experiência do profissional além de permitir que este sinal auscultado possa ser armazenado e processado digitalmente e apresentados por meio de gráficos.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACER, M.; SALERNO, M.; AGBEVIADÉ, K.; et al. Development and characterization of silicone embedded distributed piezoelectric sensors for contact detection. **Smart Materials and Structures**. v. 24, 2015.

EARIS, J., CHEETHAM, B.M.G. Current methods used for computerized respiratory sound analysis. **European Respiratory Review** 10, vol. 77, p. 586–590. 2000.

GARCIA, Eduardo A. C. **Biofísica**. 1ª Ed. São Paulo: Sarvier; 2002.

HAIBIN, Wang, et. al. Heart sound analysis based on autoregressive power spectral density. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**; 2009 Oct 17-19; Tianjin, China. 2009. p. V2-582 - V2-586.

HAORAN, Ren; HAILOG, Jin; CHEN, C.; HEMANT, Ghayvat; WEI, C. A Novel Cardiac Auscultation Monitoring System Based on Wireless Sensing for Healthcare. **IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine**. v. 6, 2018.

HU, Yating; XU, Yong. An ultra-sensitive wearable accelerometer for continuous heart and lung sound monitoring. **Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**, 2012.

IGARASHI, Massaki de Oliveira. **Utilização de Filtros para Remoção de Interferência de Sinais de Eletrocardiograma** [monografia]. Campinas: Universidade Presbiteriana Mackenzie; 2007.

KANIUSAS, Eugenijus. Acoustical signals of biomechanical systems. In: **Biomechanical Systems Technology: Volume 4: General Anatomy**. 2007. p. 1-44.

KESTER, Walt, CHAPTER 4 - Sensor Signal Conditioning, **Sensor Technology Handbook**, Newnes, 2005, Pages 31-136

KRAMAN, Steve S., Design, Construction, and Evaluation of a BioAcoustic Transducer Testing (BATT) System for Respiratory Sounds. **IEEE Trans. Biomed. Eng.** 2006.

LENG, S., TAN, R.S., CHAI, K.T.C. et al. The electronic stethoscope. **BioMed Eng OnLine** 14, 66. 2015.

LIU, W. Q. et al. The influence of preamplifiers on the piezoelectric sensor's dynamic property. **Review of Scientific Instruments**, v. 78, n. 12, p. 125107, 2007.

LOUZADA, Daniel R. **Desenvolvimento de um sensor de pressão de alta sensibilidade, baseado no fenômeno de Magnetoimpedância Gigante, para aplicação biomédica** [dissertação]. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; 2009.

OLIVEIRA, Ana; MARQUES, Alda. Respiratory sounds in healthy people: a systematic review. **Respiratory Medicine**, v. 108, n. 4, p. 550-570, 2014.

PADILLA-ORTIZ, Ana; IBARRA, David. Lung and Heart Sounds Analysis: State-of-the-Art and Future Trends. **Critical Reviews in Biomedical Engineering**. v.46, p. 33-52, 2018.

PRASANGA, D. Kasun et al. Auscultation based stethoscopic diagnostic device for cardiac murmur identification. In: **2011 IEEE International Conference on Industrial Technology**. IEEE, 2011. p. 367-372.

VALENGA, Marcelo Henrique. **Sistema eletrônico para captação de sons respiratórios adventícios em animais submetidos à ventilação mecânica**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

YILMAZ, Gurkan; RAPIN, Michael et al. A Wearable Stethoscope for Long-Term Ambulatory Respiratory Health Monitoring. **MDPI sensors Biomed**. 2020.

ZANARTU, M.; Ho, J.C.; Kraman, S.S.; Pasterkamp, H.; Huber, J.E.; Wodicka, G.R. Air-Borne and Tissue-Borne Sensitivities of Bioacoustic Sensors Used on the Skin Surface. **IEEE Trans. Biomed. Eng**. 2008.

ZHEN-GU, Xiaojun Bi. A charge amplifier with noise peaking suppression and gaindrop compensation utilizing a Quasi-Miller RC network. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, v. 107, p. 252–256, 2019.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia, à Agência de Inovação da UEA - AGIN e à Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda. pelo apoio.

Este artigo é o resultado do projeto de PD&I IA\_Machine Learning for Pneumonia Diagnose, realizado pela instituição Universidade do Estado do Amazonas, em parceria com a Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., usando recursos da Lei Federal nº 8.387/1991, estando sua divulgação e publicidade em conformidade com o previsto no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***PRE-PROCESSING TECHNIQUES FOR RESPIRATORY SOUNDS IN IA CLASSIFIERS***

### ***TÉCNICAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO PARA SONS RESPIRATÓRIOS EM CLASSIFICADORES IA***

César Augusto Menezes Nepomuceno<sup>1</sup>  
Moisés Pereira Bastos<sup>2</sup>  
João Paulo Campos Mendes<sup>3</sup>  
Victor Vermehren Valenzuela<sup>4</sup>  
Daniel Akio Chen<sup>5</sup>  
Vitoriano Medeiros Casas<sup>6</sup>

***Abstract - An effort in the research and development of autonomous systems for classification of breath sounds, aiming to assist in the early detection and treatment of pathologies, has become increasingly recurrent. In this sense, this work studied pre-processing techniques that power autonomous classifiers, in order to leverage such technologies in our country. To this end, research was conducted to survey the main methods of data preparation as well as the practical implementation of various techniques using python, a common language in the field of artificial intelligence. As a result, we obtained a guide that aims to facilitate the theoretical and practical understanding for researchers in this area.***

***Keywords: Artificial Intelligence. Preprocessing. Classifiers.***

***Resumo – Um esforço na pesquisa e desenvolvimento de sistemas autônomos de classificação de sons respiratórios, visando auxiliar na detecção e tratamento precoce de patologias, tem se tornado cada vez mais recorrente. Nesse sentido, este trabalho estudou técnicas de pré-processamento que alimentam classificadores autônomos, no sentido de alavancar tais tecnologias em nosso país. Para tal, foram realizadas pesquisas no sentido de levantar os principais métodos de preparação de dados como também realizar a implementação prática de diversas técnicas utilizando python, linguagem comum no ramo da inteligência artificial.***

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: camn.lic@uea.edu.br;

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: mpbastos@uea.edu.br;

<sup>3</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: jpcmendes@uea.edu.br;

<sup>4</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: vvalenzuela@uea.edu.br;

<sup>5</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: dac.eng17@uea.edu.br;

<sup>6</sup> Universidade do Estado do Amazonas. Contato: vmc.eai18@uea.edu.br.

*Como resultado, obteve-se um guia que visa facilitar o entendimento teórico e prático para pesquisadores embasados nesta área.*

*Palavras-chave: Inteligência artificial. Pré-processamento. Classificadores.*

## I. INTRODUÇÃO

As doenças respiratórias têm causado cada vez mais problemas para os sistemas de saúde uma vez que representam a terceira causa de mortes em todo o mundo. Com isso, grandes esforços na pesquisa têm focado no diagnóstico precoce e monitoramento contínuo em pacientes com problemas respiratórios nos últimos anos (MARQUES, OLIVEIRA E JÁCOME, 2014).

O estetoscópio é o principal método de ausculta pulmonar, que deve ser manuseado por um médico especialista, e apesar de ter se tornado digital, ainda apresenta algumas desvantagens como por exemplo a falta de um monitoramento contínuo, a necessidade de um especialista para detectar os sons de maneira adequada, entre outras incapacidades dessa ferramenta (ROCHA et. al., 2019). Logo, a possibilidade de detectar de maneira precisa sons adventícios, como sibilos e estalos, é um fator determinante em um exame médico para diagnosticar e tratar doenças respiratórias (GRZYWALSKI et. al, 2019).

Métodos automatizados podem ser úteis na detecção precoce de sons com anomalia, podendo auxiliar no tratamento precoce futuramente. Neste cenário, técnicas de machine learning, uma área da IA (Inteligência Artificial), foram introduzidas obtendo um desempenho robusto na detecção de sons em geral. Direcionado para a classificação de sons pulmonares, métodos desta área computacional alimentam os recursos do espectrograma em classificadores autônomos que exploram arquiteturas de rede poderosas como por exemplo a CNN (Convolutional Neural Network) (GRZYWALSKI et. al, 2019).

Com isso, o objetivo deste trabalho foi estudar de maneira teórica e prática as técnicas mais comuns de pré-processamento que alimentam tais classificadores no ramo da IA.

## II. METODOLOGIA

Neste artigo são apresentados fundamentos teóricos e exemplos práticos na utilização de técnicas de pré-processamento para classificação de sons respiratórios utilizando IA. Tais técnicas são comumente utilizadas na preparação do espectrograma que alimenta o classificador.

### *2.1 – Base de Dados*

Todo classificador necessita de uma quantidade muito grande de dados de entrada para realizar treinamento e posterior classificação, sendo comumente encontrados em base de dados que possuem informações diversas do tipo imagem, sons e etc. Neste estudo foi utilizada uma base de dados de sons respiratórios frequentemente usada em classificadores de sons pulmonares, sendo desenvolvida para um desafio científico na Conferência Internacional de Informática Biomédica e em Saúde (ICBHI) que aconteceu em 2017 (ROCHA et. al., 2019).

O conjunto de dados supracitado representa uma coletânea de amostras de sons respiratórios, coletadas de maneira independente por duas equipes de pesquisadores em dois países diferentes. Possui 920 áudios respiratórios e para tal contou com a participação de 126 pessoas, sendo 77 adultos e 49 crianças. A tabela 1 apresenta mais informações relevantes sobre a base de dados (ROCHA et. al., 2019).

Tabela 1 – Informações relevantes da base de dados (NA: Não Disponível).

Número de Gravações	920
Frequência de Amostragem	4 KHz (90); 10 KHz (6); 44.1 (824)
Bits por amostra	16
Duração Média de Gravação	21.5 s
Número de Participantes	126 sendo 77 adultos e 49 crianças
Gênero	79 masculino e 46 feminino (NA:1)
Idade (desvio médio padrão)	43.0 +- 32.2 anos (NA:1)
Idade dos Participantes adultos	67.6 +- 11.6 anos (NA:1)
Idade das Crianças	4.8 +- 4.6 anos
Índice de Massa Corporal dos Adultos	27.2 +- 5.4 kg m <sup>-2</sup> anos (NA:2)
Peso das Crianças	21.4 +- 17.2 kg (NA:5)
Altura das Crianças	104.7 +- 30.8 cm (NA:7)

Fonte: Rocha et. al., 2019.

## 2.2 – Exploração de Dados

Visando iniciar os estudos, foi realizada uma exploração dos dados contidos na base de dados do ICHBI 2017. Este banco de dados possui sons respiratórios normais e adventícios, sendo estes últimos divididos em sibilos, estalos ou uma combinação de ambos.

Foi estudada então uma rotina em *python* presente em Kaggle (2019), apresentada na figura 1, que gera um plot. Plots são formas de categorizar os resultados obtidos ao compilar o código. Essa categorização tem o intuito de facilitar futuras análises desses resultados por apresentá-los de uma maneira alternativa, na forma de gráficos ou outras representações visuais.

No código apresentado na figura 2 pode-se perceber que há um acesso à base de dados de áudios e uma verificação das informações de duração de cada áudio e, em seguida, é implementada a plotagem de um histograma utilizando a função *plt.hist*.

A figura 2 ilustra o plot gerado pelo trecho de código supracitado, que tem o objetivo de dividir o conteúdo da base de dados por tipos de sons respiratórios apresentando em um gráfico de barras que mostra a distribuição de durações dos áudios existentes na base de dados utilizada com a seguinte organização: O eixo vertical demonstra a quantidade de áudios com determinada duração e o eixo horizontal demonstra as durações de áudio presentes na base de dados.

Figura 1 – Trecho do código que possui a rotina

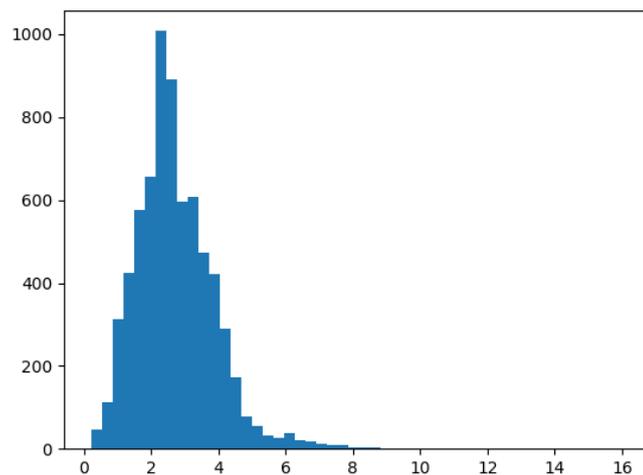
```
duration_list = []
for i in range(len(rec_annotations)):
    current = rec_annotations[i]
    duration = current['End'] - current['Start']
    duration_list.extend(duration)

duration_list = np.array(duration_list)
plt.hist(duration_list, bins = 50)
print('longest cycle:{}'.format(max(duration_list)))
print('shortest cycle:{}'.format(min(duration_list)))
threshold = 5
print('Fraction of samples less than {} seconds:{}'.format(threshold,
                                                            np.sum(duration_
list < threshold)/len(duration_list)))
```

```
longest cycle:16.163
shortest cycle:0.2000000000000000284
Fraction of samples less than 5 seconds:0.9660771238040011
```

Fonte: Kaggle, 2019.

Figura 2 – Plot gerado após exploração da base de dados ICHBI



Fonte: Kaggle, 2019.

### 2.3 – Reamostragem

Pode-se definir os sons como vibrações que se propagam pelo ar transmitindo energia. Os arquivos de áudio são geralmente armazenados no formato .wav e precisam ser digitalizados, usando o conceito de amostragem. A frequência de amostragem (ou taxa de amostragem) é o número de amostras por segundo em um som (BAHETI, 2020).

Na base de dados utilizada nesse estudo, os sons respiratórios têm diferentes taxas de amostragem. Com isso, como uma etapa fundamental de pré-processamento, foi realizada uma reamostragem de cada áudio de som pulmonar para 4000 Hz. No trecho de código apresentado na figura 3, os ciclos de áudio são armazenados em pastas que correspondem a sua categoria e neste processo ocorre a reamostragem, estabelecendo o valor de 4000 Hz com a variável *rate*, utilizando a função *write* da biblioteca *Wave*.

Figura 3 – Trecho de código referente a reamostragem

```
def extract_all_training_samples(filenamees, annotation_dict, root, target_rate, desired_length):
    cycle_list = []
    rate = 4000
    target_rate = 4000

    for file in filenamees:
        data = get_sound_samples(annotation_dict[file], file, root, target_rate)
        cycles_with_labels = [(d[0], d[3], d[4]) for d in data[1:]]
        cycle_list.extend(cycles_with_labels)
        count = 0
        for s in cycles_with_labels:
            if ((s[1] == 0) & (s[2] == 0)):
                write('C:/Users/cesar/PycharmProjects/Artigo/WAV/Normal/' + file + str(count) + '.wav', rate, s[0])
                count = count + 1
            elif ((s[1] == 1) & (s[2] == 0)):
                write('C:/Users/cesar/PycharmProjects/Artigo/WAV/Crackles/' + file + str(count) + '.wav', rate, s[0])
                count = count + 1
            elif ((s[1] == 0) & (s[2] == 1)):
                write('C:/Users/cesar/PycharmProjects/Artigo/WAV/Wheezes/' + file + str(count) + '.wav', rate, s[0])
                count = count + 1
            elif ((s[1] == 1) & (s[2] == 1)):
                write('C:/Users/cesar/PycharmProjects/Artigo/WAV/Both/' + file + str(count) + '.wav', rate, s[0])
                count = count + 1
```

Fonte: Autoria própria.

## 2.4 – Normalização

A normalização é uma técnica utilizada para ajustar o volume dos arquivos de som a um nível padrão, pois muitas vezes esses áudios de uma base de dados podem ter variações em seus níveis com referência ao volume do som. Se não for aplicada essa técnica o nível pode variar muito de palavra para palavra e o classificador pode processar de maneira inadequada.

Neste estudo foi utilizada uma função retirada da plataforma *Kaggle* que realiza cálculos para determinar qual o intervalo de valores que será atribuído às frequências dos arquivos de áudio que serão utilizados para treinamento do classificador que ao final da compilação do código irá gerar os espectrogramas de mel, conforme apresenta a Figura 4.

## III. RESULTADOS

Os métodos estudados neste artigo geralmente são utilizados como base para geração de um espectrograma em uma determinada arquitetura. Espectrogramas são representações visuais que possuem a capacidade de representar tempo, frequência e amplitude em um único gráfico. Este espectrograma vai representar muitas vezes a entrada do classificador em projetos de classificação de sons autônomos. Utilizando esta mesma técnica, mas adicionando os elementos de cálculo da escala de Mel, que é uma escala perceptual que mede tons considerados iguais em distância um do outro, existe o espectrograma de Mel.

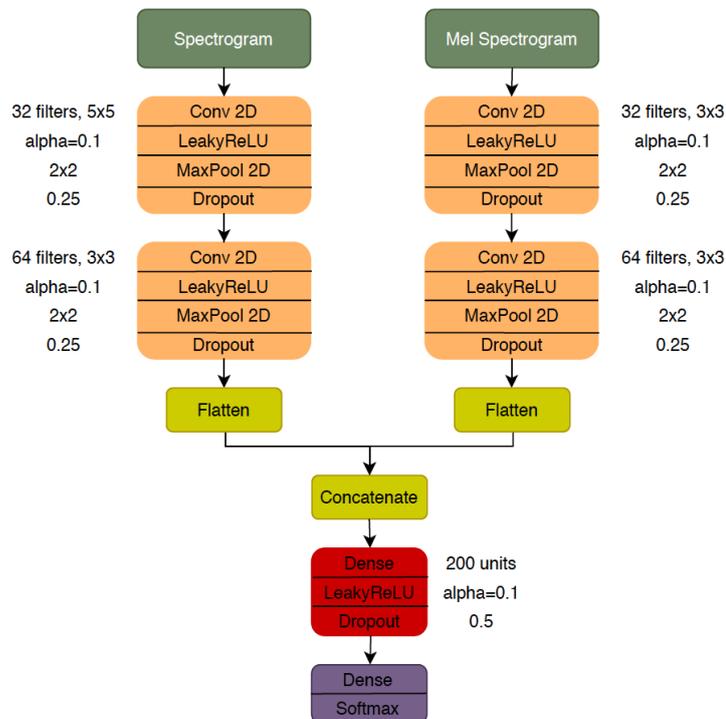
No trabalho de Rocha (2021) tem-se, por exemplo, uma arquitetura com dupla entrada, isto é, composta de espectrograma e mel espectrograma, conforme mostra a Figura 5.

Figura 4 – Rotina responsável pela normalização.

```
def sample2MelSpectrum(cycle_info, sample_rate, n_filters, vtlp_params):
    n_rows = 175 # 7500 cutoff
    n_window = 512 # ~25 ms window
    (f, t, Sxx) = scipy.signal.spectrogram(cycle_info[0], fs=sample_rate, nfft=n_window, nperseg=n_window)
    Sxx = Sxx[:n_rows, :].astype(np.float32) # sift out coefficients above 7500hz, Sxx has 196 columns
    mel_log = FFT2MelSpectrum(f[:n_rows], Sxx, sample_rate, n_filters, vtlp_params)[1]
    mel_min = np.min(mel_log)
    mel_max = np.max(mel_log)
    diff = mel_max - mel_min
    norm_mel_log = (mel_log - mel_min) / diff if (diff > 0) else np.zeros(shape=(n_filters, Sxx.shape[1]))
    if (diff == 0):
        print('Error: sample data is completely empty')
    labels = [cycle_info[1], cycle_info[2]] # crackles, wheezes flags
    return (np.reshape(norm_mel_log, (n_filters, Sxx.shape[1], 1)).astype(np.float32), # 196x64x1 matrix
            label2onehot(labels))
```

Fonte: Kaggle, 2019.

Figura 5 – Arquitetura CNN com dupla entrada



Fonte: Rocha, 2021.

### 3.1 – Geração do Espectrograma

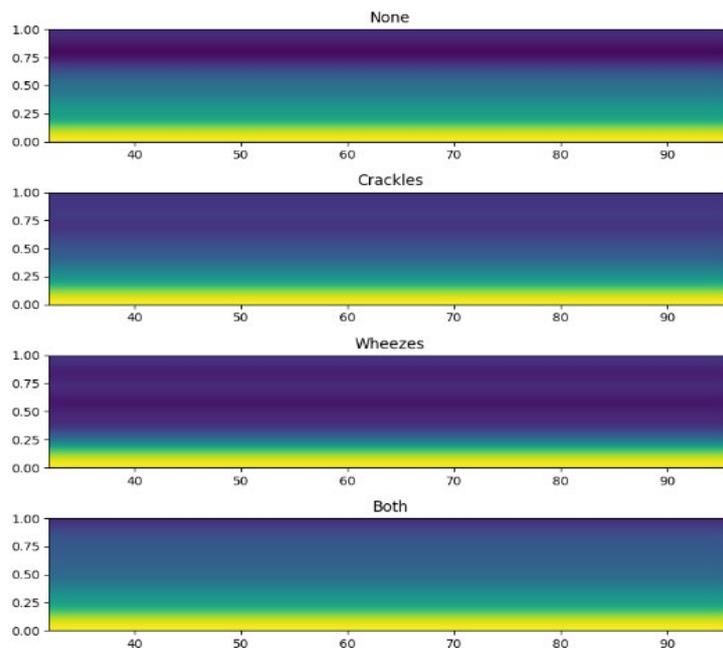
Ao fim da análise dos áudios e todo o processo de classificação, é possível gerar espectrogramas das classes as quais os ciclos respiratórios foram divididos. Este processo ocorre utilizando a função *plt.specgram* da biblioteca *matplotlib.pyplot*, conforme trecho de código apresentado na figura 6, assim como na figura 7 é possível observar os espectrogramas gerados.

Figura 6 - Plotagem de espectrogramas

```
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.subplot(4, 1, 1)
plt.specgram(training_clips['none'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('None')
plt.subplot(4, 1, 2)
plt.specgram(training_clips['crackles'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Crackles')
plt.subplot(4, 1, 3)
plt.specgram(training_clips['wheezes'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Wheezes')
plt.subplot(4, 1, 4)
plt.specgram(training_clips['both'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Both')
plt.tight_layout()
plt.colorbar(format='%+2.0f dB')
```

Fonte: Autoria própria

Figura 7 - Espectrogramas gerados pela análise dos áudios



Fonte: Autoria própria

### 3.2 – Geração do Mel Espectrograma

Após os mesmos processos citados no item 3.1, também é possível gerar espectrogramas de mel, utilizando as funções *plt.imshow*, *plt.subplot* da biblioteca *matplotlib.pyplot* apresentadas na Figura 8 e obtendo os resultados de plotagem demonstrados na Figura 9.

Figura 8 - Trecho de código para plotagem de espectrograma de mel.

```
target_sample_rate = 22000
sample_length_seconds = 5
sample_dict = extract_all_training_samples(filenamees, rec_annotations_dict, root, target_sample_rate, sample_length_seconds)
training_clips = sample_dict
sample_height = training_clips['none'][0][0].shape[0]
sample_width = training_clips['none'][0][0].shape[1]
ind = 1
plt.figure(figsize=(10, 10))
plt.subplot(4, 1, 1)
plt.imshow(training_clips['none'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('None')
plt.subplot(4, 1, 2)
plt.imshow(training_clips['crackles'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Crackles')
plt.subplot(4, 1, 3)
plt.imshow(training_clips['wheezes'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Wheezes')
plt.subplot(4, 1, 4)
plt.imshow(training_clips['both'][ind][0].reshape(sample_height, sample_width))
plt.title('Both')
plt.tight_layout()
plt.colorbar(format='%+2.0f dB')
```

Fonte: Kaggle, 2019.

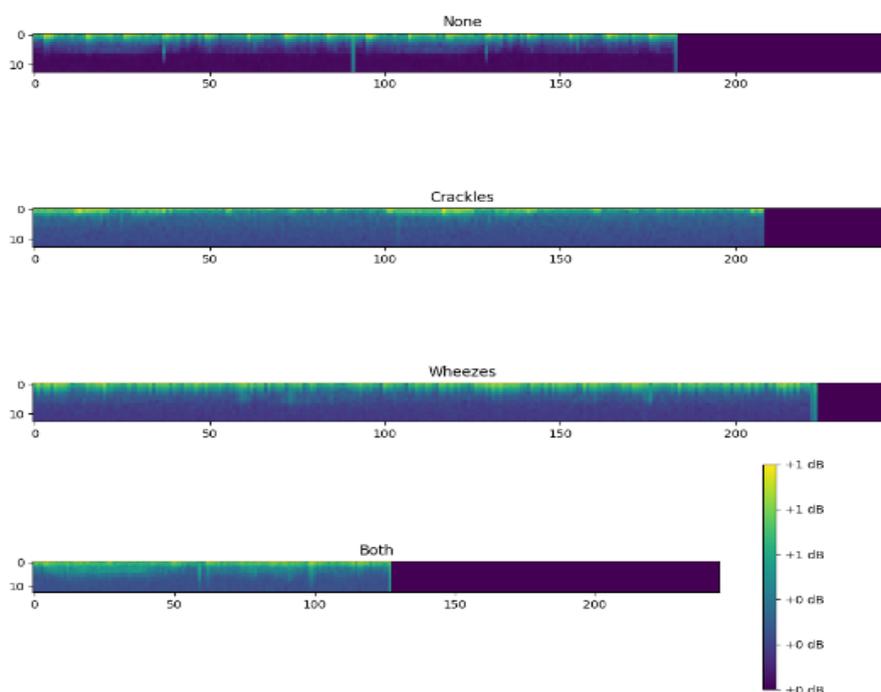
## IV. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal apresentar as principais técnicas utilizadas no pré-processamento de sons respiratórios gerando espectrogramas muito utilizados como entrada em arquiteturas de classificadores IA.

O trabalho limitou-se a apresentar aspectos teóricos e práticos com implementação de códigos utilizando linguagem de programação python, uma das mais utilizadas na área de IA. Inicialmente foi apresentada a base de dados, que representa uma coleção robusta contendo amostras normais e anormais de sons respiratórios e muito utilizada nesse ramo de pesquisa. Posteriormente se realizou uma exploração desses dados e apresentadas as técnicas de reamostragem e normalização até a geração do espectrograma e mel espectrograma.

Com isso, esse estudo representa um guia para pesquisadores que estejam inseridos nesse ramo de classificação autônoma de sons sejam eles respiratórios ou não, uma vez que tais técnicas são largamente utilizadas na classificação de sons em geral.

Figura 9 – Espectrogramas de Mel gerados pela análise dos áudios.



Fonte: Kaggle, 2019.

## V. REFERENCES

BAHETI, Pragati. **Working with Audio Data for Machine Learning in Python**. HeartBeat, 2020. Disponível em: <<https://heartbeat.fritz.ai/working-with-audio-signals-in-python-6c2bd63b2daf>> . Acesso em 20 jul 2021.

GRZYWALSKI, Tomasz; PIECUCH, Mateusz; SZAJEK, Marcin; BRĘBOROWICZ, Anna; HAFKE-DYS, Honorata; KOCIŃSKI, Jędrzej; PASTUSIAK, Anna; BELLUZZO, Riccardo. Practical implementation of artificial intelligence algorithms in pulmonary auscultation examination. **European Journal of Pediatrics** (2019) 178:883–890 <https://doi.org/10.1007/s00431-019-03363-2>

KAGGLE. **Respiratory Diseases**. 2019. Disponível em: <<https://www.kaggle.com/sakshamrawal/respiratory-diseases/data>>. Acessado em 10 ago 2021.

MARQUES, Alda; OLIVEIRA, Ana; JÁCOME, Cristina. Computerized Adventitious Respiratory Sounds as Outcome Measures for Respiratory Therapy: A Systematic Review. **Respiratory Care**, 2014, v. 59 n. 5. DOI: 10.4187/respcare.02765

ROCHA, Bruno Machado; FILOS, Dimitris; MENDES, Luís; SERBES, Gorkem; ULUKAYA, Sezer; KAHYA, Yasemin P; JAKOVLJEVIC, Niksa; TURUKALO, Tatjana L; VOGIATZIS, Ioannis M; PERANNTONI, Eleni. An open access database for the evaluation of respiratory sound classification algorithms. **Institute of Physics and Engineering in Medicine**, v. 40, n. 3, 2019.

ROCHA, Bruno Machado; PESSOA, Diogo; MARQUES, Alda; CARVALHO, Paulo; PAIVA, Rui Pedro. Automatic Classification of Adventitious Respiratory Sounds: A (Un)Solved Problem? **Sensors** 2021, 21, 57. <https://dx.doi.org/10.3390/s21010057>

## VI. AGRADECIMENTOS

Este artigo é o resultado do projeto de PD&I IA\_Machine Learning for Pneumonia Diagnose, realizado pela instituição Universidade do Estado do Amazonas, em parceria com a Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., usando recursos da Lei Federal nº 8.387/1991, estando sua divulgação e publicidade em conformidade com o previsto no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020.

Os autores agradecem a Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia, a Agência de Inovação da UEA - AGIN e a Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda. pelo apoio.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.

## Área: Ciências Humanas e Sociais

---

7-8	<b>ERASMUS+ STUDENT MOBILITY AS A TOOL FOR DEVELOPING PERSONAL SKILLS: A CASE STUDY</b>  <b>MOBILIDADE ESTUDANTIL ERASMUS+ COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS PESSOAIS: UM ESTUDO DE CASO</b> Marjorie Sacha Pontes Eugênio; António Vitor Nunes de Carvalho
-----	---

## ***ERASMUS+ STUDENT MOBILITY AS A TOOL FOR DEVELOPING PERSONAL SKILLS: A CASE STUDY***

### ***MOBILIDADE ESTUDANTIL ERASMUS+ COMO FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS PESSOAIS: UM ESTUDO DE CASO***

Marjorie Sacha Pontes Eugênio<sup>1</sup>  
António Vitor Nunes de Carvalho<sup>2</sup>

***Resumo – O objetivo deste trabalho foi verificar se a mobilidade estudantil do programa transnacional ERASMUS+ se caracteriza como um meio de desenvolvimento de competências pessoais em estudantes participantes do programa. A metodologia consistiu em empregar uma análise qualitativa sobre os dados obtidos a partir da técnica de entrevistas semiestruturadas aos estudantes do programa. O estudo foi realizado com estudantes da Universidade de Aveiro com idades de 21 a 23 anos, participantes do programa entre os anos de 2018 a 2020 destinados a Polónia e Letónia. Os resultados mostram que características como autonomia, maturidade e autoconhecimento foram bem definidas e intensificadas de acordo com os estudantes. A pesquisa permitiu apontar estratégias que visam a melhoria do programa não somente na Universidade de Aveiro, mas de um modo geral no contexto das instituições de ensino superior.***

***Palavras-chave: Mobilidade estudantil. Desenvolvimento de competências pessoais. Mobilidade estudantil transnacional ERASMUS+.***

***Abstract – The objective of this work was to verify whether the student mobility of the transnational ERASMUS+ program is characterized as a means of developing personal skills in students participating in the program. The methodology consisted of employing a qualitative analysis of the data obtained from the technique of semi-structured interviews with the students of the program. The study was conducted with students from the University of Aveiro aged 21 to 23 years, participants of the program between 2018 and 2020 destined to Poland and Latvia. The results show that characteristics such as autonomy, maturity and self-knowledge were well defined and intensified according to the students. The research allowed us to point out***

<sup>1</sup> Universidade de Aveiro. Contato: [msachapontes@ua.pt](mailto:msachapontes@ua.pt);

<sup>2</sup> Universidade de Aveiro. Contato: [avitor@ua.pt](mailto:avitor@ua.pt).

*strategies aimed at improving the program not only at the University of Aveiro, but in general in the context of higher education institutions.*

*Keywords: Student mobility. Development of personal skills. ERASMUS+ transnational student mobility.*

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, questões relacionadas a mobilidade estudantil assumem importante papel nos debates educacionais e políticos mundialmente (RUEDA; DE CARVALHO, 2019; EUROPEAN COMMISSION, 2020). A mobilidade estudantil é considerada como uma ferramenta de desenvolvimento socioeducacional e econômico (ARANA, 2021), que permite reduzir barreiras geopolíticas (COSTA, J., & GONÇALVES, V. 2020). Alguns fatores podem comprometer os objetivos atrelados ao processo de mobilidade estudantil. Dentre eles está a possibilidade que os estudantes participantes do programa de mobilidade, não adquiram competência pessoais, como autoconhecimento, autonomia e maturidade (DE MELO, J. L. L., BUENO, J. M., & DOMINGUES, C. R. 2021). Outro fator importante para isso é a diversidade cultural desse processo de globalização (DELL’OIO, & MARTINEZ, 2019), por exemplo a mobilidade transnacional do programa ERASMUS+ da Universidade de Aveiro, em Portugal. Assim, objetivo deste trabalho foi verificar se o programa contribui para o desenvolvimento das competências pessoais de autoconhecimento, autonomia e a maturidade dos alunos participantes. Espera-se que a instituição participante do programa, adote medidas que o torne mais eficiente, contribuindo para uma formação sólida e mais cidadã.

### *1.1. A importância da mobilidade transnacional estudantil nas questões educacionais e políticas mundiais*

Em termos gerais, a mobilidade estudantil pode ser definida como o deslocamento provisório do estudante de sua universidade de origem para outra no mesmo país ou estrangeiro (CRUZ, 2021). Esse processo se configura numa importante ferramenta de desenvolvimento socioeducacional e econômica, pois permite ao estudante conhecer e desenvolver novos costumes por meio da interação com outras culturas e novos métodos de ensino, atribuindo maior significância e qualidade na sua formação profissional e cidadã, devido ao desenvolvimento de competências pessoais (EUGÊNIO; DE CARVALHO, 2021).

De maneira ampla, a definição de mobilidade estudantil pode ser estendida e com isso compreendida como parte integrante de um processo mais amplo e complexo que não se limita a difusão do conhecimento apenas entre as fronteiras internas de um lugar, isto é, entre regiões, distritos, cidades ou estados de um país (PESSONI, 2021). Esse processo visa o cambiamento do conhecimento além das barreiras geopolíticas, culturais e econômicas entre os países, configurando-se numa verdadeira ferramenta de internacionalização do ensino em particular o superior, e assim sendo dita como *mobilidade transnacional estudantil* (LOMBAS, 2017; QUIROGA, 2020; PESSONI, 2021).

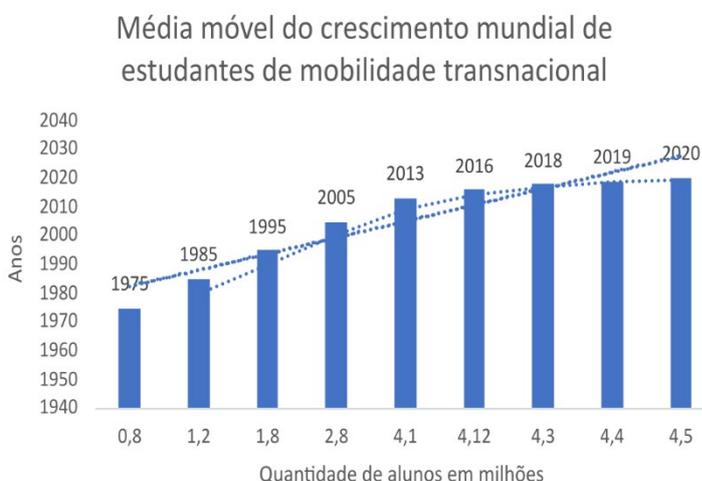
Dessa forma, esse tipo de mobilidade estudantil é considerado um processo fundamental no ganho de eficiência e qualidade do ensino superior e da pesquisa científica e que resulta de forma direta do processo de globalização contemporânea e das exigências impostas por ela (COSTA, J., & GONÇALVES, V 2020). A mobilidade transnacional de estudantes representa também um dos principais aspectos da internacionalização, sendo perseguida e enfatizada pelas distintas políticas e atores que a promovem (TOSTES; SILVA, 2019).

Dentre as questões educacionais envolvidas entorno do tema da mobilidade transnacional estudantil atualmente, destacam-se a cooperação científica, tecnológica, cultural e ainda a possibilidade de compartilhamento de grupos de pesquisas, de diplomas, acolhimento mútuos de alunos de graduação e de pós-graduação (OLIVEIRA; FREITAS, 2016). Essas questões, permitem definir os programas de mobilidade transnacional de estudantes como uma das mais importantes, senão a mais importante ferramenta de cooperação acadêmica existente atualmente, apesar de não ser um fenômeno recente, porém intensificado nos últimos 30 anos (UNESCO, 2009). O sucesso desse processo, no cumprimento dessas metas no ramo educacional pode ser evidenciado pelos números apresentados de alunos estrangeiros em circulação pelo mundo através de algum programa de mobilidade transnacional.

De acordo com dados fornecidos pela OCDE (2012) entre os anos de 1999 a 2009, o número de estudantes internacionais em circulação apresentou um crescimento de 53%, que representou num crescimento médio de 5,5% ao ano (UNESCO, 2009). O número de alunos estrangeiros circulando em todo o mundo saltou de 2,8 milhões para 4,1 milhões entre os anos de 2005 a 2012 (OCDE, 2015). Em 2019 esse número superou a marca de 4,4 milhões com a expectativa de que a projeção chegasse aos 4,5 milhões no ano de 2020. No entanto em virtude do fenômeno da pandemia de COVID19, os programas de mobilidade em todo mundo foram reduzidos ou cessados.

Na figura 1, é possível observar por meio da média móvel, que os processos de mobilidade em todo o mundo apresentaram maior circulação de estudantes entre os anos de 2005 a 2019, com ápice dentro da série histórica, no ano de 2013, com 4,1 milhões de alunos em circulação em todo o mundo através de algum programa de mobilidade transnacional.

Figura 1 – Crescimento mundial da mobilidade transnacional



Fonte: Eugênio; de Carvalho, 2021.

Mesmo assim, espera-se um crescimento no número de países integrantes nos processos de mobilidade estudantil para os próximos anos como resultado do aumento das expectativas dos alunos, dos benefícios trazidos para as IES envolvidas, da melhora da qualidade do capital humano que é o principal contributo agregado por esse processo, e ainda da competitividade que a mobilidade pode proporcionar, especialmente nos países de economia emergente (VÁZQUEZ; MESA; LÓPEZ, 2014).

Entre os inúmeros interesses associados aos programas de mobilidade transnacional, pelas instituições de ensino superior e do estado, destaca-se as questões políticas a níveis institucionais que se manifesta através das conexões entre os países, utilizando-se como vetor as instituições de ensino, permitindo como isso franquias tecnológicas e a maior flexibilidade na circulação de pessoas entre as fronteiras geopolíticas. As políticas de mobilidade estudantil adotadas entre os países participantes possibilitam a ruptura dessas barreiras ocasionando uma maior integração sociocultural (DE SOUSA LIMA, L. 2018).

Um das manifestações dessa integração cultural está na difusão ou na aprendizagem de um idioma específico por parte dos alunos participantes do programa de mobilidade. Esse processo de integração cultural, traduzido através da disseminação de um idioma e no franqueamento de tecnologias técnico-educacional obtidos pela mobilidade, se caracteriza como processo maior e complexo, chamado de *internacionalização hegemônica*, de modo que a direção dos fluxos de estudantes dos programas de mobilidade transnacional estudantil mostra as relações de “domínio e dominado”, ou seja, os países ditos hegemônicos são polos receptores ou alvo da maioria dos alunos dos programas de mobilidade internacional, evidenciado assim uma estrutura de dominação acadêmica e a dependência cultural (MORAES, M. C. B., & LEAL, F. G. 2021).

Esse desequilíbrio nessas relações em geral pode ser bem determinado geograficamente, isto é, essa supremacia socioeducacional e tecnologia na maioria esmagadora beneficia os países situados ao norte do planeta, dentre eles estão, Europa: Reino Unido, Alemanha, França, Irlanda e outros países ricos do bloco da união europeia; na Ásia: Coreia do Sul, Japão, China entre outros; nas Américas: Canadá, Estados Unidos, México, Granada e Brasil.

Ainda de acordo com os dados fornecidos pela UNESCO (UNESCO, 2010), apenas dez países em todo o mundo concentravam 90% da mobilidade transnacional para alunos de doutorado recebidos nos campos das ciências e das engenharias, sendo os Estados Unidos a maior potência educacional, tecnológica, financeira e política, recebem anualmente quase o 50% do total. A outra parte, dos 50% ficam distribuídas entre os outros países que concentram a mobilidade transnacional são: Reino Unido, França, Canadá, Alemanha, Suíça, Japão, Malásia e Suécia (num ranking entre 2 e 9%).

No que se refere a América Latina (exceto Cuba) entre os anos de 1999 e 2014, todos os países apresentaram um fluxo de estudantes de mobilidade transnacional negativos, o que caracteriza um déficit. Isso é devido, ao fato que os estudantes nacionais que saem representam um número maior em relação aos estudantes estrangeiros que chegam. Alguns exemplos desse fenômeno foram Brasil e México, que tiveram mais

alunos saindo que chegando com um déficit de 15 mil alunos. De maneira inversa destaca-se a Costa Rica e Uruguai que apresentaram um déficit de apenas 1 mil alunos.

De um modo geral, a América Latina apresentou um déficit de aluno de mobilidade transnacional. Países como Argentina, Brasil, Chile, Equador, México e Venezuela, juntos, apresentam um déficit na média anual de quase 73 mil estudantes. No início do processo de internacionalização das IES, a mobilidade estudantil estava centrada nos programas de pós-graduação *stricto sensu*, no entanto, na década de 1990 em diante, os países hegemônicos iniciam um processo de ampliação da sua influência sobre o sistema mundial de educação, atraindo estudantes de graduação (CINDA, M. R. 2016).

A Tabela 1, através dos dados fornecidos pela UNESCO e OCDE, é possível avaliar e indicar o sentido dos fluxos da mobilidade transnacional estudantil.

Tabela 1 – Países com maior mobilidade transnacional e características hegemônicas.

Países com maior mobilidade	Nº Estudantes enviados	Nº Estudantes recebidos	Países que mais receberam estudantes dos países referentes	Em 2010	Em 2014		
<b>Estados Unidos</b>	2010 50.756 OCDE + 1.813 G20	2010 212.835 OCDE + 270.298 G20 + 174.742 Demais países	Coreia	71.514	1.355		
			Reino Unido	15.670	14.950		
			Canadá	27.896	8.049		
			Granada		4.544		
			Alemanha	3.922	4.523		
			2014 67.665	2014 907.251	França	3.435	3.201
					Japão	24.622	2.034
					México	13.331	-
					Outros...	...	...
					Brasil	424	663
<b>Reino Unido</b>	2010 33.495 OCDE + 1.813 G20	2010 198.431 OCDE + 130.942 G20 + 198.916 Demais países	Irlanda	22.862	1.579		
			Alemanha	20.157	1.798		
			<b>Estados Unidos</b>	<b>9.463</b>	<b>7.137</b>		
			Outros...	...	...		
			Brasil	275	318		
<b>China</b>	2010 534.179 OCDE + 102.176 G20	2010 -	Estados Unidos	126.498	291.063		
			Austrália	87.588	97.387		
			Reino Unido	62.309	86.204		
			Japão	86.553	85.226		
			2014 801.187	2014 123.127	Canadá	35.592	42.011
					Coreia	45.757	34.513
					Outros	...	...
					Brasil	354	332
					<b>Polônia</b>	<b>18.029</b>	
					França	17.584	2.110
2014 31.078	2014 428.724	Estados Unidos	15.670	9.601			
		Holanda	862	2.060			
		Austrália	1.661	1.592			
		Outros...	...	...			
		Brasil	331	122			
<b>Alemanha</b>	2010 120.280 OCDE + 2.948 G20	2010 144.911 OCDE + 48.083 G20 + 95.525 Demais países	Turquia	29.873	728		
			Polônia	12.350	682		
			Itália	8.857	1.520		
			Áustria	8.245	27.150		
			Holanda	22.066	23.579		
			2014 116.342	2014 228.756	Reino Unido	20.157	13.846
		Suíça	13.811	11.742			

Fonte: Eugênio; de Carvalho, 2021.

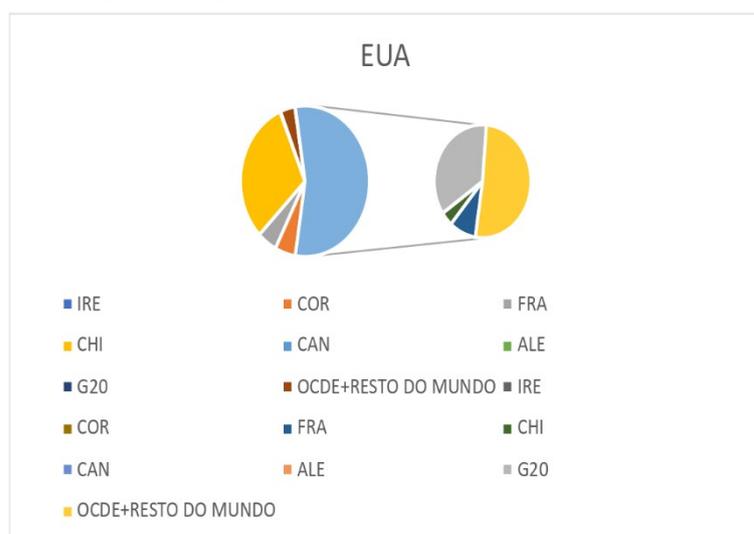
## 1.2. A importância econômica da mobilidade transnacional na economia mundial

Intimamente associada aos processos de globalização que impõem sobre a sociedade moderna um novo paradigma social, econômico, tecnológico que viabiliza um processo de construção do conhecimento voltado para compreender e aplicar esse conhecimento para o desenvolvimento social, econômico e na melhoria das relações culturais e no mundo do trabalho. A mobilidade estudantil, ao mesmo tempo que desempenha a propagação de conhecimento, fator indispensável para o crescimento e desenvolvimento de qualquer país, permite também os inserir num contexto em que a dinâmica do acesso a informação, melhorias nas estruturas de comunicação e redução de custos na formação de estudantes. Esses fatores, são peças-chaves para a inserção de países desenvolvidos e principalmente os em desenvolvimento, numa sociedade globalizada marcada pelo dinamismo econômico e relações comerciais pautadas no desenvolvimento tecnológico e educacional, que define a educação de alto nível, como um produto comercial de alto valor econômico (CASTRO; NETO, 2012).

Dessa forma é possível afirmar que dentro do contexto de um mundo globalizado, onde a internacionalização do conhecimento pode ser vista como uma relação comercial focada nos movimentos de capitais financeiros e humanos, tecnológicos, e a mobilidade transnacional estudantil ganha uma dimensão além dos propósitos educacionais e políticos, e assume a extensão de uma mobilidade de recursos humanos altamente qualificados, se configurando assim numa transferência de tecnologia, conhecimento e cultura.

Na Figura 2, representada por dois gráficos em forma de “pizza”, é mostrada a relação existente entre os principais Países em mobilidade transnacional estudantil. Nela, é possível ver quais países recebem mais alunos de mobilidade do que enviaram. Dados obtidos referentes ao ano de 2014 (UNESCO, 2018).

Figura 2 – Relação entre os principais países envolvidos em mobilidade transnacional em todo mundo.

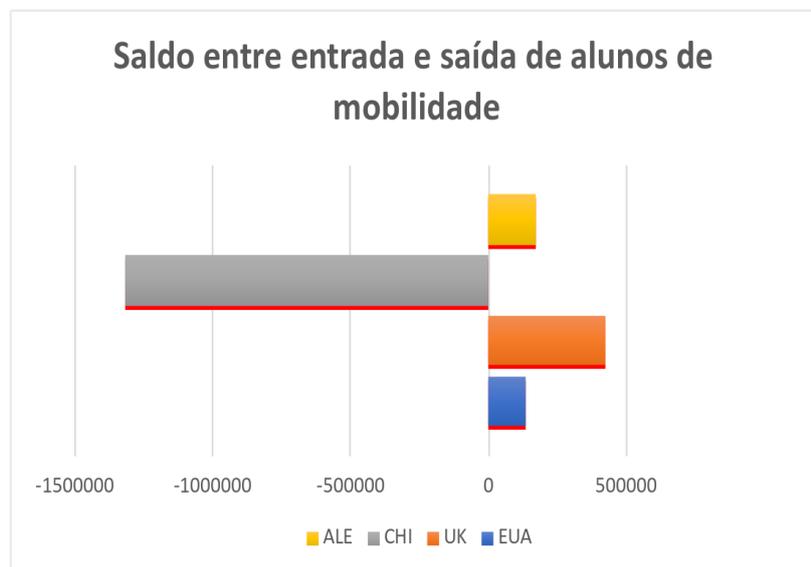


Fonte: Eugênio; de Carvalho, 2021.

A relação entre o círculo da esquerda (o maior) e o da direita (o menor), mostra a parcela de alunos que chegam em determinado país através de algum programa de mobilidade transnacional. O fluxo da mobilidade é da direita para a esquerda. No lado esquerdo em azul, está representado o Canadá e está associado ao círculo do lado direita, a faixa amarela (a área do setor no gráfico), a China. Essa representação indica que o Canadá recebe a maior parte dos alunos de mobilidade oriundos da China. Esse gráfico ainda indica a hegemonia, exercida pelo Canadá sobre a China que atrai alunos de mobilidade. Os fatores são além dos educacionais, tecnológicos, culturais, de idioma, destacando-se as oportunidades de emprego. De modo similar, do lado esquerdo no gráfico, apresenta a tendência da China (amarelo) e outros países da OCDE+G20 e o resto do mundo (em marrom escuro), em atraírem estudantes vindos da França e de outras partes do mundo como Países pertencentes a América Latina (países mais pobres). Por fim as faixas nas cores cinza claro e marrom claro, correspondem a Coreia do Sul, e outros integrantes do G20 em atraírem estudantes vindos da França (em azul, no gráfico) e Alemanha (em verde), no gráfico da direita. Acima dos 02 gráficos aparece a sigla, EUA (Estados Unidos da América). Ela representa, que em todos os casos os estados unidos é o país que recebe mais alunos de mobilidade em todo mundo. A figura 3 mostra a grande capacidade em atrair estudantes. Esse fato está relacionado aos altos níveis de desenvolvimento educacionais, tecnológicos e principalmente econômicos.

Esse fato, por ser observado com maior clareza na figura 3, onde é mostrada o saldo entre alunos que entra num país, menos os que saem dele através de algum programa de mobilidade.

Figura 3 – Países com maior mobilidade transnacional e características hegemônicas.



Fonte: Eugênio; de Carvalho, 2021

Na figura 3, é mostrado um gráfico que representa o saldo entre alunos que saem menos os que entram em um país através de algum programa de mobilidade. Nele são representados os EUA (cor azul); Reino Unido (cor laranja); Alemanha (cor amarela) e China (cor cinza). Os EUA, apresentaram um saldo de 135.626 alunos, Reino Unido (*United King – UK*), com saldo de 42.1399 e Alemanha, com 17.5052 alunos de

mobilidade. Todos eles, aparecem ao lado direito do gráfico mostrando saldo positivo indicando que esses países recebem mais aluno que enviam. O único que aparece ao lado esquerdo, a China (cor cinza), apresenta um saldo negativo, indicando maior saída do que entrada de alunos, indicando maior saída de alunos de mobilidade registrado nessas quatro potencias econômicas.

Apesar dos EUA serem o país que mais recebe alunos de mobilidade em todo mundo, o gráfico mostra que no ano de 2014 (UNESCO, 2018), recebeu mais alunos de mobilidade em valores absolutos que os Estados Unidos e Alemanha. Apesar da economia chinesa ser a segunda maior do mundo ficando apenas atrás da norte americana, a grande busca de alunos chineses por países europeus e norte americanos (Canadá e EUA), evidencia que a China ainda está em processo de crescimento e desenvolvimento educacional, tecnológico e econômico. Dessa forma, junto a fatores sociais e principalmente econômicos como oportunidades de empregos e bons salários são um dos principais fatores atrativos para esses alunos.

### *1.3. Mobilidade transnacional ERASMUS + como ferramenta de desenvolvimento de competências pessoais*

Resultado de um esforço cooperativos acadêmico entre os estados membros da União Europeia, o Programa Erasmus+ nasce com o objetivo de promover a mobilidade internacional no âmbito do ensino superior, entre os países membros. A criação do programa foi fundamentada em quatro itens: (a) o primeiro foi o desenvolvimento de uma identidade europeia nos jovens europeus; (b) o segundo, a viabilização de mobilidade entre os estados membros da União Europeia, nas futuras carreiras profissionais dos jovens estudantes; (c) terceiro item, a necessidade de transferência de competências, conhecimentos e tecnologias no continente; por fim, o quarto item (d), que foi promover o desenvolvimento de competências interpessoais, associada a interculturalidade e a aprendizagem de idiomas (PAPATSIBA, 2005).

O Erasmus+, principal representante dos programas de mobilidade transnacional na Europa, deve seu sucesso principalmente devido por seguir os principais objetivos da União Europeia, traçados para que se alcance maior integração e unidade continental (SETTE-CÂMARA39, T., & PINTO40, M. J. A. O., 2021). Entre os principais meios para se chegar a esses objetivos estão conseguir maior cooperação e expansão da mobilidade internacional de jovens estudantes. Vários documentos e tratados incorporam em seus artigos esse pré-requisitos, e reafirmam ao longo de seus textos o objetivo de promover a cooperação e a mobilidade acadêmica, como instituem as diretrizes para a continuidade de programas de mobilidade acadêmica, principalmente no âmbito do ensino superior.

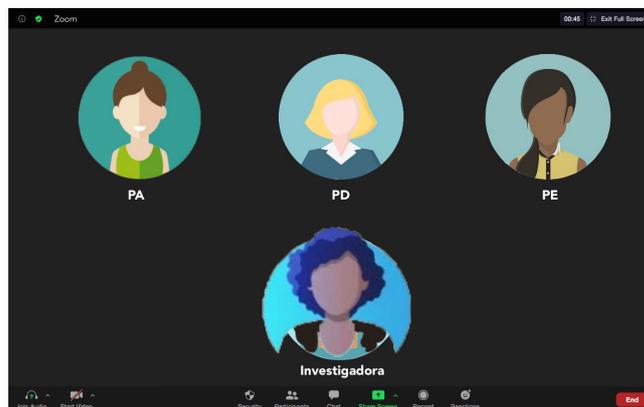
O interesse da União Europeia em promover e estimular a mobilidade acadêmica, principalmente através do Programa Erasmus+, está alicerçado no objetivo de promover uma Europa mais coesa e integrada (RESCHKE; BIDO, 2017). De modo geral, junto a esses objetivos, a mobilidade transnacional do programa Erasmus+ pode ser definida como uma das principais estratégias de internacionalização indispensável para a formação dos estudantes, pois proporciona aquisição de conhecimentos, habilidades e atitudes

essenciais para que o indivíduo possa vivenciar o mundo globalizado, além de interagir no mercado pluricultural e contribuir para o desenvolvimento social e tecnológico do país (LUCE; FAGUNDES; MEDIEL, 2017).

## II. METODOLOGIA

A metodologia utilizada empregou uma investigação de natureza qualitativa, utilizando para isso uma estratégia de investigação que se caracterizou com um estudo de caso. Foram selecionados 05 alunos da Universidade de Aveiro, em Portugal, ex-integrantes do programa de mobilidade transnacional do programa ERASMUS+ entre os anos de 2018 a 2020. Os países de destino foram a Polônia (04 alunos) e Letônia (01 aluno). As idades dos alunos variavam entre 21 a 23 anos, pertencentes aos cursos de Licenciatura em economia (03 alunas), e Mestrado em engenharia industrial (01 aluna e 01 aluno). Após isso, foi aplicado a técnica de entrevista semiestruturada, através de um guião de perguntas (formulário). A aplicação das entrevistas foi feita através de vídeos chamadas através da plataforma Zoom. Cada entrevista foi gravada e posteriormente, realizada a transcrição dos áudios para a coleta dos dados de interesse.

Figura 4 – Representação das entrevistas (semiestruturadas) realizadas pela pesquisadora utilizando a plataforma Zoom.



Fonte: Eugênio; de Carvalho, 2021.

O guião de perguntas continha 04 blocos de perguntas. O primeiro, é referente a legitimação e motivação da pesquisa ao entrevistado; o segundo se referia aos dados do entrevistado; o terceiro bloco, se subdivide em 03 partes referentes a: (A) motivação do entrevistado em participar do programa de mobilidade, (B) perguntas sobre competências pessoais, (C) fatores de desenvolvimento de competências pessoais. O bloco 04 se referiu a finalização da entrevista e agradecimento por parte do entrevistador. Isso permitiu lidar com as condições contextuais de forma abrangente, consideradas altamente pertinentes ao estudo, tendo como principal preocupação os significados, que os sujeitos investigados deram ao fenômeno investigado.

### III. RESULTADOS

Os resultados versaram sobre o significado que os estudantes atribuem às competências. Em relação a autonomia, os entrevistados a definiram em aspectos gerais como a capacidade de realizarem suas atividades; a maturidade foi associada ao facto de ganharem mais responsabilidade sobre as suas ações e, o autoconhecimento associado a capacidade de conhecer seus limites e potencialidades. Autonomia e maturidade significaram maior independência e melhoria na capacidade de resolução de problemas, enquanto o autoconhecimento representou a capacidade do sujeito conhecer-se melhor como pessoa.

### IV. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, observou-se que o trabalho cumpriu com seus objetivos, e gerou discussões sobre o tema permitindo indicar estratégias a serem adotadas para melhorias do programa no contexto das instituições de ensino superior, em particular da Universidade de Aveiro.

### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, A. A., & NETO, A. C. (2012). O ensino superior: a mobilidade estudantil como estratégia de internacionalização na América Latina. **Revista Lusófona de Educação**, 21(21), 69-96.

CINDA, M. R. (2016). **Improving teaching and learning reading skill by using problem based learning method for the eighth year students of smp n 1 jogonalan klaten in academic year 2015/2016** (Doctoral dissertation, Universitas Widya Dharma).

COSTA, J., & GONÇALVES, V. (2020). A importância da mobilidade académica internacional na vida discente. **AdolesCiência: Revista Júnior de Educação**, 7(1), 73-77.

CRUZ, E. A. T. D. (2021). **Internacionalização como estratégia institucional na Escola Superior de Enfermagem Cruz Vermelha Portuguesa: Alto Tâmega** (Doctoral dissertation).

DE CARVALHO, A.V.N (2019). **Desafios da União Europeia para a educação e formação: da Estratégia de Lisboa à Europa 2020** (Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro). Obtido de Microsoft Word - Tese Corpo do Texto VF (ua.pt)

DE MELO, J. L. L., BUENO, J. M., & DOMINGUES, C. R. (2021). As dimensões do cross-cultural competence inventory como estruturantes do desenvolvimento de competência intercultural em programas de mobilidade académica internacional. **Revista de Gestão e Secretariado**, 12(1), 53-78.

DELL'OLIO, F., & MARTINEZ, J. Z. (2019). Interculturalidade e internacionalização em tempos de globalização neoliberal: desafios, complexidades e possibilidades. **Revista x**, 14(5), 82-105.

DE SOUSA LIMA, L. (2018). **Estudar e circular entre fronteiras (in) transponíveis: a mobilidade de mulheres cabo-verdianas que cursam engenharia em Portugal.**

EUGÊNIO, M. S. P; DE CARVALHO, A. V. N, 2021. Mobilidade estudantil erasmus+ como ferramenta de desenvolvimento de competências pessoais: um estudo de caso. **XLIV International Sodebras Congress 10 a 12 de novembro de 2021 – web conference.**

EUROPEAN COMMISSION. **ERASMUS+ ANNUAL REPORT 2018.** Luxemburgo: publications Office of the European Union, 2020. Relatório. Obtido de: Erasmus+ annual report 2018 - Publications Office of the EU (europa.eu)

LOMBAS, M. L. D. S. (2017). A mobilidade internacional acadêmica: características dos percursos de pesquisadores brasileiros. **Sociologias**, 19, 308-333.

LUCE MB, FAGUNDES CV, MEDIEL OG, (2017). Internacionalização da educação superior: a dimensão intercultural e o suporte institucional na avaliação da mobilidade acadêmica Avaliação **Rev Aval Educ Super** [Internet]. 2016 [citado 2017 ago. 08]; 21(2):317-39. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aval/v21n2/1982-5765-aval-21-02-00317.pdf>

MORAES, M. C. B., & LEAL, F. G. (2021). Globalização, (de) colonialidade e (contra) hegemonia no contexto da internacionalização da educação superior: o grito surdo da academia. **REAd. Revista Eletrônica de Administração** (Porto Alegre), 27, 313-342.

OCDE (2012), Education at a Glance 2012: **OECD Indicators**, OECD Publishing.

OCDE (2015), Education at a Glance 2015: **OECD Indicators**, OECD Publishing.

OLIVEIRA, A. L. D., & FREITAS, M. E. D. (2016). Motivações para mobilidade acadêmica internacional: a visão de alunos e professores universitários. **Educação em Revista**, 32, 217-246.

PAPATSIBA, V. (2005). Political and Individual Rationales of Student Mobility: a case-study of ERASMUS and a French regional scheme for studies abroad. **European journal of education**, 40(2), 173-188.

PESSONI, R. B., & PESSONI, A. (2021). Internacionalização do ensino superior e a mobilidade acadêmica. **Educação** (UFSM), 46(1), 86-1.

QUIROGA, S. R. (2020). Alunos e internacionalização: mobilidade estudantil nos processos de internacionalização. **Revista Internacional de Educação Superior**, 6, e020023-e020023.

RESCHKE MJD, BIDO MCF, (2017). Potencializando a experiência de internacionalização: reflexões sobre o Programa Ciência sem Fronteiras. **Espaço Pedagógico** [Internet]. 2017 [citado 2017 nov. 16];24(1):128-38. Disponível:<http://seer.upf.br/index.php/rep/article/view/6997/4161>.

RUEDA, J. L. (2019, FEBRUARY). Internacionalização da educação superior: mobilidade estudantil intrarregional na América Latina e Caribe. In **I Congresso Internacional Pensamento e Pesquisa sobre a América Latina**.

SETTE-CÂMARA<sup>39</sup>, T., & PINTO<sup>40</sup>, M. J. A. O., (2021) Programa Erasmus e a política de mobilidade na Europa. *Educação e desenvolvimento*, 291.

TOSTES, A. P. B., & SILVA, L. V. B. (2019). O projeto Erasmus: internacionalização da educação em contexto de integração| The Erasmus project: internationalization of education in the context of integration. *Mural Internacional*, 10, 37988.

UNESCO. Instituto de Estatística. **Crescimento de longo prazo dos estudantes internacionais de terceiro nível 1975-2013**. 2015. Disponível em: Disponível em: [https://en.unesco.org/sites/default/files/1-4\\_growth\\_international\\_students.pdf](https://en.unesco.org/sites/default/files/1-4_growth_international_students.pdf)

UNESCO INSTITUTE FOR STATISTICS. (2009). 'New trends in international student mobility'. [http://www.uis.unesco.org/template/pdf/ged/2009/UIS\\_press\\_conference\\_presentation.pdf](http://www.uis.unesco.org/template/pdf/ged/2009/UIS_press_conference_presentation.pdf), accessed 4 July 2011.

UNESCO Institute for Statistics. (2010) **Global Education Digest 2010: Comparing Education Statistics Across the World**, Montreal, Canada: UNESCO Institute for Statistics.

VÁZQUEZ, L. K.; MESA, F. R.; LÓPEZ, D. A. To the ends of the Earth: student mobility in Southern Chile. *International Journal of Educational Management*, Bingley, v. 28, n. 1, 2014, p. 82-95.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem à Universidade de Aveiro em Portugal e ao Departamento de Educação e Psicologia por todo apoio prestado.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores deste trabalho são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## Área: Ciências Agrárias e Biológicas

---

4-2	<b>FINITE ELEMENTS: DIALOGUE BETWEEN ENGINEERING AND DENTISTRY – BIBLIOGRAPHY REVIEW</b>  <b>ELEMENTOS FINITOS: DIÁLOGO ENTRE A ENGENHARIA E ODONTOLOGIA – REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA</b> Douglas Andrin Edmundo; Teófilo Miguel de Souza
-----	---

## ***FINITE ELEMENTS: DIALOGUE BETWEEN ENGINEERING AND DENTISTRY – BIBLIOGRAPHY REVIEW***

### ***ELEMENTOS FINITOS: DIÁLOGO ENTRE A ENGENHARIA E ODONTOLOGIA – REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA***

Douglas Andrin Edmundo<sup>1</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>2</sup>

***Resumo – A análise do comportamento estrutural dos materiais artificiais utilizados na engenharia em amplas aplicações e do comportamento estrutural de materiais biológicos, como o tecido ósseo, aplicando a teoria da elasticidade, possibilita um diálogo entre a engenharia e a odontologia. A partir da análise do comportamento estrutural, distribuição de tensões, deslocamentos e da relação linear entre as tensões e deformações, permite a utilização de ferramentas computacionais que adotam a análise pelo método de elementos finitos. Neste artigo, são apresentadas as similaridades desse comportamento que justificam a aplicação de tecnologias avançadas de análise estrutural em materiais biológicos para estudos da interface osso-implante, em específico o estudo da remodelagem óssea.***

***Palavras-chave: Elementos Finitos. Densidade Mineral Óssea. Remodelagem Óssea.***

***Abstract - The analysis of the structural behavior of artificial materials used in engineering in wide applications and the structural behavior of biological materials, such as bone tissue, applying the theory of elasticity, enables a dialogue between engineering and dentistry. From the analysis of structural behavior, stress distribution, displacements and the linear relationship between stresses and strains, it allows the use of computational tools that adopt the finite element method of analysis. In this article, we present the similarities of this behavior that justify the application of advanced technologies of structural analysis in biological materials for studies of the bone-implant interface, specifically the study of bone remodeling.***

***Keywords: Finite Elements. Bone Mineral Density. Bone remodeling.***

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: douglas.andrini@unesp.br;

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: teofilo.souza@unesp.br.

## I. INTRODUÇÃO

A teoria da elasticidade que conhecemos hoje, teve seu início a partir dos estudos de Robert Hooke em 1676, através dos seu experimento com conjuntos de massa-mola, que hoje define a lei fundamental da elasticidade. Mas, somente em 1802 é que Thomas Young desenvolveu a noção de módulo de elasticidade a partir da relação entre força e deformação a partir dos estudos de Hooke. Entretanto o conceito de tensão que conhecemos foi introduzido apenas em 1821 por Cauchy. (Katz, et al, 1987)

A relação constitutiva para o tecido ósseo foi desenvolvida por Julius Wolf em 1872 e é reconhecida com “Wolff’s Law of bone remodeling”, obtendo a relação constitutiva pela formulação algébrica da Lei de Wolff do equilíbrio da remodelagem arquitetônica do osso trabecular, particularmente devido a relação constitutiva geral entre tensão deformação e módulo de elasticidade onde o requisito da comutatividade ocorre pela multiplicação da matriz do tensor de tensão e do tensor de tecido em equilíbrio de remodelação. (Frost, 1994) (Cowin, 1986) (Stock, 2018) (Cowin, et al, 1976) (Hegedus, et al, 1976) (Cowin, et al, 1978).

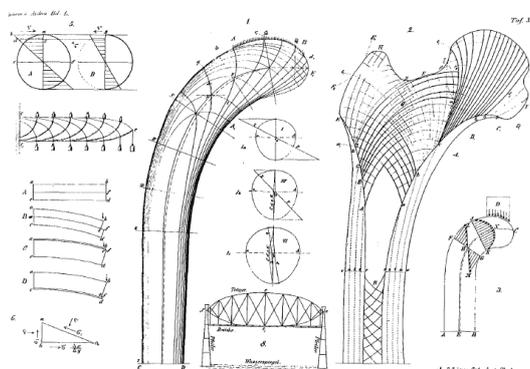
Essa similaridade de comportamento e relação constitutiva possibilita definir as condições de contorno dos vínculos na interface osso-implante e osso-dente. A definição dos graus de liberdade e das ancoragens podem ser estabelecidas conforme as convenções fornecidas pela estática das estruturas, quanto aos graus de liberdade e as restrições impostas pelos vínculos. Essas vinculações possibilitam que sejam determinados os deslocamentos e os esforços solicitantes atuantes nos elementos constituintes dessa microestrutura formada pela junção osso-implante ou osso-dente (Rietbergen, et al, 1996).

A condição de contorno desejada para a interface osso-implante é compatível com um engaste, ou apoio de terceiro gênero, onde os graus de liberdade de translação e rotação são restringidos, surgindo forças reativas nas regiões de contato da interface da ligação de um material artificial, o implante, e do material biológico, o tecido ósseo. (Huiskes, et al, 1984).

O comportamento elástico do tecido ósseo ocorre devido a duas fases de composição do material que consiste na hidroxiapatita, responsável pela composição da matriz mineral e o colágeno, responsável pela composição da matriz orgânica. (Katz, et al, 1971).

O estudo da variação da densidade mineral óssea possibilita entender o processo de remodelagem óssea que tem função primordial na ancoragem de implantes dentários na mandíbula e maxila, na interface osso-implante que garanta estabilidade e resistência da ancoragem. O uso de simulação numérica no estudo da densidade óssea e da remodelagem, representa a variação da densidade do tecido ósseo quando solicitada por estímulos mecânicos. (Su, 2017).

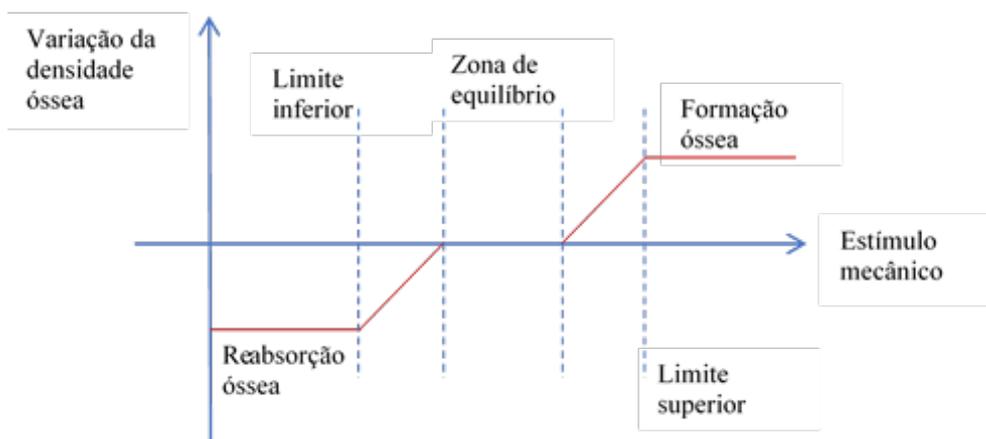
Figura 1 - A esquerda, as trajetórias principais das tensões indicada por Culmann. A direita, esquema de Von Meyer's da arquitetura do osso trabecular na seção próxima da extremidade de um fêmur humano. Nos dois casos, o fêmur é carregado transversalmente.



Fonte: Wolff, 1872 e Cowin, 1986.

A utilização de um modelo simplificado da variação da densidade óssea, linearmente proporcional para diferentes modos de estímulos mecânicos e zona de equilíbrio, Figura (2), apresenta as três zonas de remodelagem e reabsorção óssea devido a intensidade das tensões ao longo do tempo. (Su, 2017).

Figura 2 - Variação da densidade mineral óssea submetida a estímulos mecânicos.



Fonte: Adaptado de Su. K, 2017

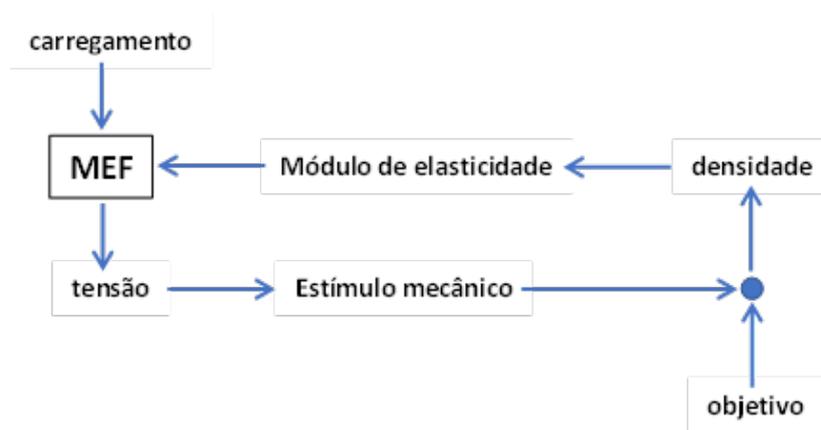
## II. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação por elementos finitos pode ser executada por diversos softwares encontrados no mercado, para calcular as tensões e a energia de mastigação atuantes na estrutura do dente e a transmissão desses esforços para o tecido ósseo através da

ancoragem entre osso-implante. (Jacobs, et al, 1997) (Beaupré, et al, 1990) (Pandorf, et al, 1999)

A integração da formulação da remodelagem óssea e dos códigos aplicados no Método dos Elementos Finitos (MEF) são apresentados na Figura (3).

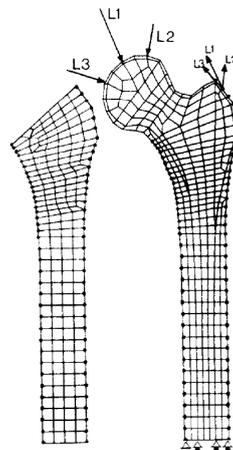
Figura 3 – Mecanismo de resposta interativa do MEF, para simulação computacional do modelo da remodelagem mecanicamente induzida.



Fonte: Adaptado de Weinans, H. et al, 1992

O desenvolvimento de modelos aproximados para aplicação da análise bidimensional com Método dos Elemento Finitos, são construídos conforme mostrado na Figura (4).

Figura 4 – Malha de elementos finitos para o modelo aproximado de um fêmur. O modelo a esquerda é conectado ao modelo a direita no lado medial e lateral através dos nós da malha e são cortes longitudinais perpendiculares entre si. O modelo à direita (corte frontal) tem uma espessura uniforme de 12 mm e a placa à esquerda (corte lateral), possui espessura variável, reduzindo de 4mm para 0,4 mm na extremidade inferior. Todos os elementos são isoparamétricos com quatro nós e um campo de deslocamento linear. L1, L2 e L3 são os carregamentos aplicados na cabeça do fêmur.



Fonte: Adaptado de Weinans, H. et al, 1992

As propriedades do tecido ósseo ao entorno do implante podem ser inseridas na simulação para analisar o comportamento de cada material envolvido na análise, assumindo um comportamento elástico linear isotrópico ou anisotrópico. (Su, 2017) (Katz, et al, 1987) (Huikes, 1987) (Crupi, et al, 2004).

Para o tecido ósseo, as propriedades mecânicas do material são obtidas por meio de ensaios, como o módulo de elasticidade (E) é definido a partir da densidade óssea ( $\rho$ ) e da constante C, segundo Carter e Hayes (1977), como sendo:

$$E=C\rho^3 \tag{1}$$

Onde a constante C é determinada pelo produto do módulo de elasticidade à compressão com densidade aparente ( $\rho_c$ ) igual a  $1\text{gm/cm}^3$  e a deformação específica ( $\epsilon$ ) variando no tempo. (Hayes, 1977) (Miodowska, et al, 2016)

A variação da densidade óssea submetida à estímulos mecânicos, pode ser calculada utilizando a equação diferencial ordinária (2). (Li, et al., 2007) (Weinans, et al, 1992).

$$\frac{d\rho}{dt} = B \left( \left( \frac{\sigma^2}{2C\rho^4} \right) - k \right) - D \left( \left( \frac{\sigma^2}{2C\rho^4} \right) - k \right)^2 \tag{2}$$

Em 1984, Cowin, Ashman, Burkisk e Rice, no seu estudo “Uma técnica contínua para a medição das propriedades elásticas do osso cortical”, apresentaram a equação matricial para um material ortotrópico em função do módulo de Young, coeficiente de Poisson e do módulo de cisalhamento, equação (3).

$$\begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \tag{3}$$

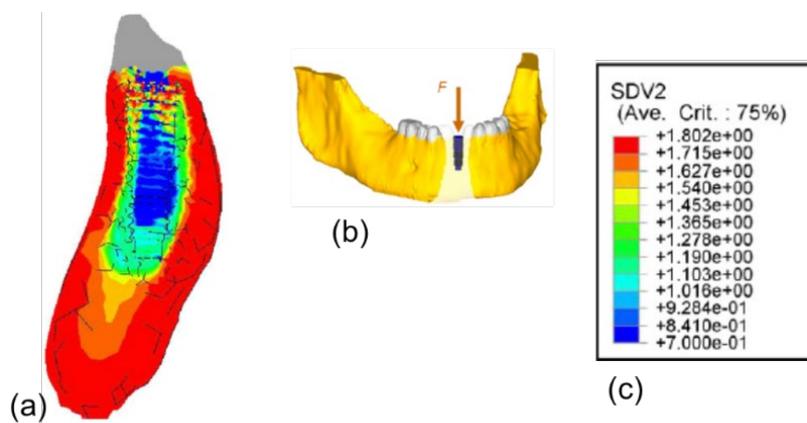
A matriz de flexibilidade para o tecido ósseo foi definida por Ashman e Buskirk (1987), é dada pela equação (3) e a forma matricial na equação (4), onde T representa as componentes de tensão, E representa as componentes de deformação e C representa os coeficientes de flexibilidade, que caracteriza a propriedade ortotrópica do tecido ósseo pelas nove componentes independentes de flexibilidade. (Ashman e Buskirk, 1987) (Yang, et al, 1999).

$$\begin{Bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ 2E_{23} \\ 2E_{13} \\ 2E_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

A partir dessas descobertas sobre as propriedades do tecido ósseo, da compatibilidade e similaridade de comportamento estrutural, os estudos da variação da densidade óssea podem ser elaborados utilizando o método dos elementos finitos, que possibilita uma análise mais precisa e ampla em diversas posições e conformações dos materiais em um tempo muito mais rápido do que a utilização por meio analítico ou mesmo utilizando um algoritmo para solução das equações diferenciais.

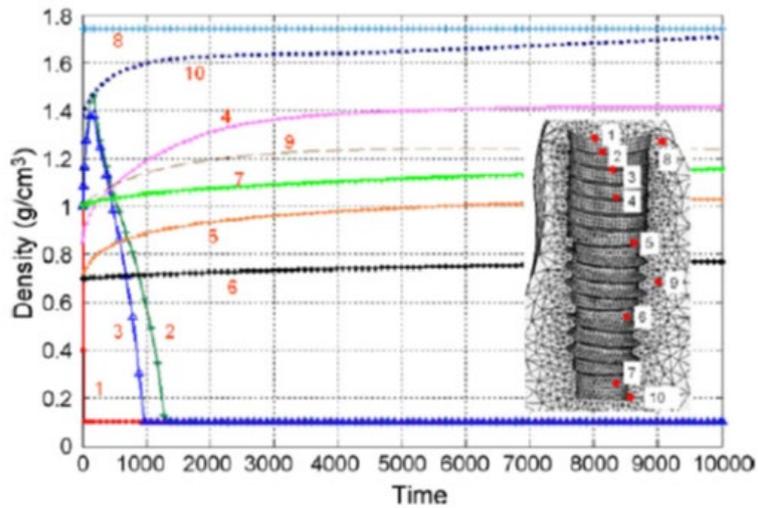
As aplicações na odontologia do método dos elementos finitos, possibilita o desenvolvimento de estudos mais sofisticados e com a apresentação de melhores resultados e podem aplicados de diversas formas de análise estrutural, como apresentado nas Figuras (5), (6) e (7).

Figura 5 – (a) Análise da variação densidade óssea da mandíbula em torno de um implante dentário utilizando FEM, (b) Posição do implante na mandíbula, (c) Escala de densidade óssea em g/cm<sup>3</sup>. Aplicação de um modelo matricial da Teoria da Elasticidade.



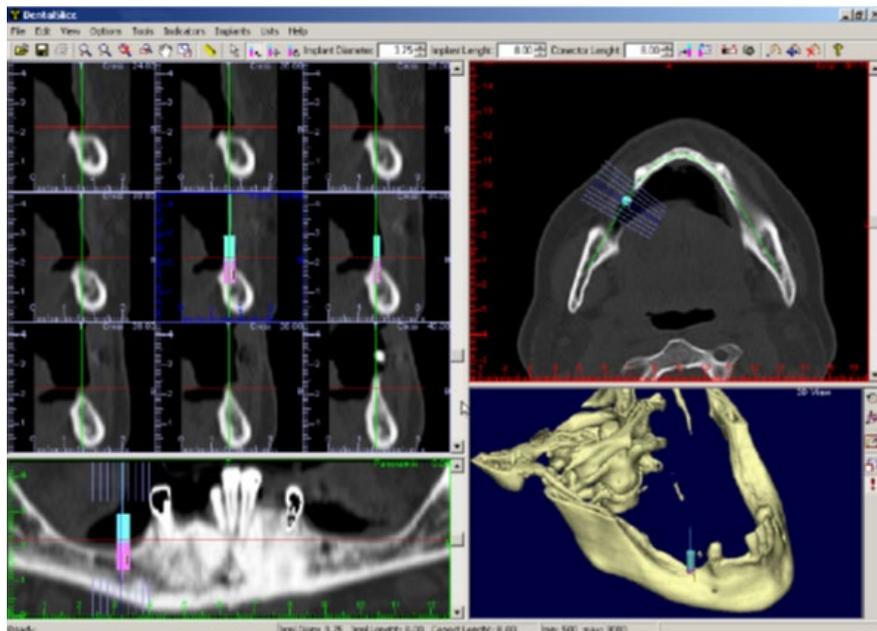
Fonte: Li, 2007

Figura 6 – Variação da densidade em diversos pontos em torno de um implante ao longo do tempo.



Fonte: Li, 2007

Figura 7 – Imagem de tomografia no software DentalSlice. Delimitação do corte em curva, gerando uma reconstrução panorâmica, na qual pode-se definir a espessura e demarcar no canal mandibular.



Fonte: Manual DentalSlice V2.1.1

### III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo apresenta as evidências encontradas na bibliografia, na tentativa de estabelecer a relação com grande parte do passado teórico e atual dos estudos desenvolvidos na área de remodelagem óssea, certificando de que o tecido ósseo pode ser

analisado estruturalmente utilizando o método dos elementos finitos para as mais diversas aplicações na odontologia.

A aplicação do MEF na análise do comportamento do tecido ósseo e nas interfaces com os dentes ou implantes contribui para o melhor desenvolvimento e entendimento do processo de osseointegração sem que necessite do uso imediato de modelo animal ou in vitro. A tecnologia de simulação computacional e matemática permite testar diversas hipóteses e combinações dos diversos parâmetros que envolvem as condições de contorno do problema que possibilitará evoluir no entendimento da osseointegração.

A revisão da bibliografia apresentada nesse trabalho, considera que a utilização do método dos elementos finitos na odontologia é uma forma de desenvolver e melhorar as práticas clínicas e terapêuticas, por meio dos estudos desenvolvidos com uso de uma ferramenta computacional para se obter resultados que possam abranger limites maiores da análise estrutural do comportamento dos materiais, alcançando melhorias significativas nos tratamentos e proporcionar melhores condições de saúde aos pacientes.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHMAN, R. B., BUSKIRK, W. C. VAN. The elastic proprieties of a human mandible. **Intenational and American Associations for Dental Research**. 1987.

ASHMAN, R. B., COWIN, S. C., VAN BURSKIRK, W. C., RICE, J. C. A continuous wave techneque for the measurement of the elasc proprieties of cortical bone. **J. Biomechanics**. Vol. 17. N° 5. Pp 349-361. 1984.

BEAUPRÉ, G. S., ORR, T. E., CARTER, D. R. An approach for time-dependent boné modeling and remodeling – application: a preliminar remodeling simulation. **Journal of Orthopedic Research**. New York. 1990.

COWIN, S. C., Wolff's Law of trabecular architecture at remodeling equilibrium. **Journal of Biomechanical Enineering**. Vol. 108. N° 83. 1986.

COWIN, S. C., HEGEDUS, H. D. Bone remodeling I: theory of adaptive elasticity. **Journal of Elasticity**. Leyden. 1976.

COWIN, S. C., NACHLINGER, R. R.. Bone remodeling III: uniqueness and atability in adaptive elasticity theory. **Journal of Elasticity**. Netherlands. 1978.

CRUPI, V., GUGLIELMINO, E., LA ROSA, G., SLOTEN, J. V., OOSTERWYCK, H.V., Numerical analysis of bone adaptation around an oral implant due to overload stress. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: **Journal of Engineering in Medicine**. 2004;218(6):407-415.

FROST, H. M., **Skeletal structural adaptations to mechanical usage (SATMU): 1 redefining Wolf's Law**, departament of orthopaedic surgery, Southern Colorado Clinic, 1990

- FROST, H. M., Wolff's Law na bone's structural adaptations to mechanical usage: na overview for clinicians. **The Angle Orthodontist**. Vol. 64. N°3. 1994.
- HEGEDUS, D. H., COWUIN, S. C. Bone remodeling II: small strain adaptive elasticity. **Journal of Elasticity**. Leyden. 1976.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**, 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HUISKES, R. WEINANS, H, GROOTENBOER H. J., DALSTRA, M., FUDALA, B., SLOOF, T. J. Adaptive bone-remodeling theory Applied to prosthetic-design analysis. **Journal Biomechanics**. Vol. 20, N° 11/12. Pp 1135-1150. Great Britain, 1987.
- HUISKES, R., NUNAMAKER, D. Local stresses and bone adaptation around orthopedic implants. **Calcified Tissue International**. Springer-Verlag. 1984.
- JACOBS, C. R., SIMO, J. C., BEAUPRÉ, G. S. CARTER, D. R. Adaptive bone remodeling incorporating simultaneous density and anisotropy considerations. **Journal Biomechanics**. Vol. 30. N° 6, pp 603-613. Great Britain. 1997.
- KATZ, J. L., MEUNIER, A. The elastic anisotropy of bone. **Journal Biomechanics**. Vol. 20, N° 11. pp 1063-1070. Great Britain, 1987.
- KATZ, J. L., UKRAINCIK, K. On the anisotropic elastic properties of hydroxiapatite. **Journal Biomechanics**. Vol. 4, pp 221-227. Great Britain. 1971.
- KOCH, J. C. **The laws of bone architecture, from the department of anatomy**, Johns Hopkins Medical School, BALTIMORE, 1917
- LI, Jianying, LI, Haiyan, SHI, LI. A Mathematical Model for simulating the bone remodeling process under mechanical stimulus. **Dental Material**, Science Direct. Elsevier. 2007
- MIODOWSKA, J., BIELSKI, J., SZYDEK, M. K. A new model of bone remodeling. **Engineering Transactions**. 64, 4, 605-611. Cracow, Poland, 2016.
- PANDORF, T., HADDI, A., WIRTZ, D. C., LAMMERDING, J., FORST, R., WEICHERT, D. Numerical simulation of adaptive bone remodeling. **Journal of Theoretical and Applied mechanics**.
- PENDO, N. D., ELIAS, C. N., PACHECO, M. C. T., GOUVÊA, J. P. Simulação 3d de movimento ortodôntico. **Dental Press Journal**, 2010.
- RIBEIRO, G. L. U., JACOB, H. B. Compreendendo o fundamento do fechamento de espaços na ortodontia, para um tratamento ortodôntico mais eficiente. **Dental Press Journal of Orthodontics**. 2016.
- RIETBERGEN, B. V., ODGAARD, A., KABEL, J., HUISKES, R. Direct mechanics assessment of elastic symmetries and properties of trabecular bone architecture. **Journal Biomechanics**. Vol. 29. N° 12, pp 1653-1657. Great Britain. 1996. Aachen. 1999.
- STOCK, J. T., (2018). **Wolff's Law** (bone functional adaptation). 1-2. 10.1002/9781118584538.ieba0521.

SU, K., YUAN, L., DU, J. Bone remodeling under tooth loading. the minerals, **Metal & Materials Society**. 2017.

WEINANS, H., HUISKES, R., GROOTENBOER, H. J. The behavior of adaptive bone-remodeling simulation models. **Journal Biomechanics**. Vol 25. N° 12. Pp 1425-1441. Great Britain, 1992.

YANG, G., KABEL, J., VAN RIETBERGEN, B., ODGAARD, A., HUISKES, R., COWUIN, S. C. The anisotropic Hook's Law for cancellous bone and wood. **Journal of Elasticity**. Netherlands, 1999.

## VIII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## Área: Ciências Exatas e Engenharias

3-1	<p><b>ECONOMIC ANALYSIS OF AN EV SOLAR CHARGING SYSTEM BASED ON ENERGY CONSUMPTION ESTIMATES FOR VEHICLES USED ON PEOPLE TRANSPORTATION</b></p> <p><b>ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA SOLAR DE CARREGAMENTO VEICULAR BASEADA NA ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE PESSOAS</b></p> <p>André Luiz Zamponi Ribeiro; Teófilo Miguel de Souza; Pedro Magalhães Sobrinho</p>
3-4	<p><b>IRRADIANCE AND TEMPERATURE ESTIMATION IN A TYPICAL PHOTOVOLTAIC SYSTEM</b></p> <p><b>ESTIMAÇÃO DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO TÍPICO</b></p> <p>João Marcos dos Santos Souza; Cassius Zanetti Resende; Wagner Teixeira da Costa</p>
3-5	<p><b>ANALYSIS OF A WATER PUMPING SYSTEM USING A VERTICAL AXIS WIND TURBINE IN THE BRAZILIAN SCENARIO</b></p> <p><b>ANÁLISE DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA UTILIZANDO UM AEROMOTOR EÓLICO DE EIXO VERTICAL NO CENÁRIO BRASILEIRO</b></p> <p>Andrei Testi; Teófilo Miguel de Souza</p>
3-5	<p><b>ECONOMIC ANALYSIS OF AN EV SOLAR CHARGING SYSTEM BASED ON ENERGY CONSUMPTION ESTIMATES FOR VEHICLES USED ON PEOPLE TRANSPORTATION</b></p> <p><b>ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA SOLAR DE CARREGAMENTO VEICULAR BASEADA NA ESTIMATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE PESSOAS</b></p> <p>André Luiz Zamponi Ribeiro; Teófilo Miguel de Souza; Pedro Magalhães Sobrinho</p>
3-5	<p><b>BARRIERS TO THE ADOPTION OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW</b></p> <p><b>BARREIRAS À ADOÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS ÀS EDIFICAÇÕES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b></p> <p>Talita Mariane Cristino; Antonio Faria Neto; Otávio José De Oliveira; Teófilo Miguel de Souza</p>
3-5	<p><b>STUDY OF THE APPLICATION OF 3D PRINTING FOR MANUFACTURING ELECTRIC VEHICLES</b></p> <p><b>ESTUDO DA APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D PARA MANUFATURA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS</b></p> <p>Jonas Cardoni Neto; Teófilo Miguel de Souza</p>

3-5	<p><b>INFLUENCE OF PENTAERYTHRITOL ESTER ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ABS</b></p> <p><b>INFLUÊNCIA DO ÉSTER DE PENTAERITRITOL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ABS</b></p> <p>Adiniele Martins de Faria; Carlos Henrique de Silva; Otavio Bianchi</p>
3-5	<p><b>THE CURRENT PANORAMA OF WIND TURBINES AVAILABLE ON THE MARKET</b></p> <p><b>O PANORAMA ATUAL DOS AEROGERAADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO</b></p> <p>Natasha Martins Rodrigues de Jesus; Rafael Soares Souza; Teófilo Miguel de Souza; Thais Santos Castro</p>
3-5	<p><b>SOLAR TRACKERS: A LITERATURE REVIEW</b></p> <p><b>RASTREADORES SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b></p> <p>Rafael Soares Souza; Natasha Martins Rodrigues de Jesus; Teófilo Miguel de Souza; Thais Santos Castro</p>

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF FIXED PLATFORMS FOR LINEAR AND NONLINEAR SEA STATE MODELING**

### **ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PLATAFORMAS FIXAS PARA MODELAGEM LINEAR E NÃO- LINEAR DO ESTADO DE MAR**

Elias Duarte Oliveira<sup>1</sup>  
Flávio de Souza Barbosa<sup>2</sup>  
Elson Magalhães Toledo<sup>3</sup>  
Marcos Vinícius Rodrigues<sup>4</sup>

**Resumo** – Os combustíveis fósseis, importantes componentes da matriz energética brasileira, são obtidos quase que em sua totalidade através de plataformas de exploração offshore. Sob a ótica da engenharia estrutural, a análise das condições ambientais a que estas plataformas estão expostas é um fator fundamental para segurança e eficiência da operação. A ação das ondas marítimas é um dos principais fatores no cômputo dos esforços estruturais. A natureza desta ação é dinâmica, complexa e dominante sobre o comportamento estrutural. Neste trabalho, foi avaliada a resposta estrutural de uma plataforma fixa do tipo jaqueta para estados de mar modelados através da Teoria Linear de Onda de Airy e Teoria de Stokes de Segunda Ordem. Os resultados evidenciam as diferenças na força hidrodinâmica e na resposta estrutural para as teorias estudadas, além de mostrar a convergência das teorias para ondas de pequenas amplitudes.

**Palavras-chave:** Plataformas fixas. Teorias de Onda. Estado de Mar. Dinâmica Estrutural. Modelagem Computacional.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia – Juiz de Fora, MG, Brasil. Contato: [elias.duarte@engenharia.ufjf.br](mailto:elias.duarte@engenharia.ufjf.br);

<sup>2</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia – Juiz de Fora, MG, Brasil. Contato: [flavio.barbosa@engenharia.ufjf.br](mailto:flavio.barbosa@engenharia.ufjf.br);

<sup>3</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia – Juiz de Fora, MG, Brasil. Contato: [emtc@lncc.br](mailto:emtc@lncc.br);

<sup>4</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia – Juiz de Fora, MG, Brasil. Contato: [marcos.rodrigues@ufjf.edu.br](mailto:marcos.rodrigues@ufjf.edu.br).

*Abstract - Fossil fuels, important components of the Brazilian energy matrix, are obtained almost entirely through offshore exploration platforms. From the perspective of structural engineering, the analysis of the environmental conditions to which these platforms are exposed is a fundamental factor for the safety and efficiency of the operation. The action of ocean waves is the main factor in the computation of structural efforts. The nature of this action is dynamic, complex and dominant over structural behavior. In this work, the structural response of a fixed jacket platform to sea states modeled using Airy's Linear Wave Theory and Second Order Stokes Theory were evaluated. The results show the differences in hydrodynamic loads and structural response for these theories, furthermore, it shows the convergence of theories for small amplitude waves.*

**Keywords:** *Fixed Jacket Platforms. Wave Theory. Sea State. Structural Dynamics. Computational Modeling.*

## I. INTRODUÇÃO

A participação dos combustíveis renováveis na matriz energética brasileira é uma das mais altas do mundo. Contudo os recursos não renováveis ainda predominam. De acordo com o Balanço Energético Nacional, EPE (2021), os combustíveis não renováveis representam 51,6% da matriz energética brasileira, sendo o petróleo e seus derivados responsáveis por 33,1% desta contribuição. Segundo dados do boletim mensal da Agência Nacional do Petróleo ANP (2021), a exploração offshore convencional (pós-sal) e o pré-sal representam juntas um valor superior a 90% da produção nacional de petróleo e gás. A extração desses recursos é feita através de plataformas e navios. As plataformas de exploração podem ser classificadas como: Plataformas apoiadas no fundo do mar (ou fixas), plataformas flutuantes e plataformas mistas (ou complacentes).

As plataformas fixas são estruturas de suporte que permanecem presas ao leito oceânico pela ação de seu peso próprio (plataformas fixas de gravidades) ou através de estacas cravadas no solo (plataforma fixa do tipo jaqueta). As plataformas fixas do tipo jaqueta, Figura 1, são compostas por estruturas modulares de aço e operam em profundidades de até 300 metros. A jaqueta é uma estrutura tridimensional de membros tubulares que serve de apoio para a superestrutura.

O projeto de estruturas offshore é influenciado por condições diferentes das encontradas nas estruturas usuais em terra firme. A norma americana RP2A-WSD API (2000) destaca, dentre o conjunto de ações atuantes sobre as estruturas offshore, o que classifica como cargas ambientais (environmental loads). Tais cargas são impostas à estrutura por fenômenos naturais como o vento, as correntes marinhas e ondas marítimas. A ação das ondas é um dos principais componentes das cargas ambientais, sobretudo em condições meteorológicas extremas. Logo, caracterizar e mensurar, o que na literatura é chamado de estado de mar, é uma etapa fundamental para a análise e projeto das estruturas offshore. As teorias de ondas são modelos matemáticos que buscam descrever o estado de mar através da cinemática das partículas do fluido. Uma vez conhecido o comportamento do fluido em termos de seus campos vetoriais de velocidade, aceleração e demais derivados destes, é possível obter, a partir de formulação adequada, a ação das

ondas sobre determinada estrutura. No presente trabalho, buscou-se avaliar o comportamento dinâmico estrutural de uma plataforma fixa para diferentes estados de mar modelados por duas teorias de onda distintas: A Teoria Linear de Airy e a Teoria de Onda de Stokes de Segunda ordem.

Figura 1 - Representação de uma plataforma fixa do tipo jaqueta.



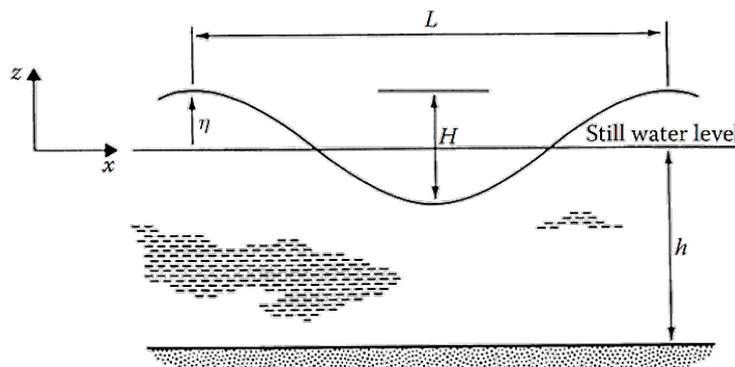
Fonte: HSM Offshore.

### 1.1. Teoria Linear de Onda

A teoria linear foi proposta pelo matemático e astrônomo britânico George Biddell Airy no século 19. Ela fornece uma descrição linearizada da propagação de ondas em um fluido ideal. Esta também é conhecida como: teoria de Airy, teoria de onda de primeira ordem e teoria de pequenas amplitudes.

A Figura 2 mostra o perfil de uma onda regular com altura  $H$  e comprimento  $L$ . A onda se propaga de forma bidimensional no plano  $xz$  em um meio de profundidade  $h$ . A elevação da superfície em um ponto  $x$ , denotada  $\eta$ , em um instante de tempo  $t$  é dada pela Equação 1.

Figura 2 - Perfil de elevação de onda regular.



$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos\left(2\pi\left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right)\right) \quad (1)$$

A Teoria de Airy considera que o escoamento do fluido é irrotacional. Desta forma o campo vetorial de velocidades das partículas do fluido  $\vec{V}(u, w)$  deriva de um campo escalar denominado função potencial de velocidade  $\phi$  Equação 2. A equação da continuidade será satisfeita se o divergente do campo de velocidades for nulo, o que pela definição deste campo corresponde à equação de Laplace, Equação 3.

$$\vec{V} = -\nabla\phi \quad (2)$$

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

A solução da equação governante de Laplace obedecendo às condições de fronteiras impostas pela teoria linear, fornece o potencial de velocidade  $\phi$ , Equação 4. A partir deste potencial obtêm-se as componentes horizontais e verticais do campo de velocidade (equações 5 e 6) e acelerações (equações 7 e 8).

$$\phi(x, z, t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$u = \frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{dx}{dt} = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

$$w = \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{dz}{dt} = \zeta_a \cdot \omega \cdot \frac{\sinh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = \zeta_a \cdot \omega^2 \cdot \frac{\cosh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$\dot{w} = \frac{dw}{dt} = -\zeta_a \cdot \omega^2 \cdot \frac{\sinh(k(h+z))}{\sinh(kh)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t) \quad (8)$$

Onde:

$\zeta_a = \frac{H}{2}$  corresponde a amplitude de uma onda regular;  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular da onda,  $k = \frac{2\pi}{L}$  é chamado número de onda,  $x$  e  $z$  são as coordenadas espaciais do ponto em análise (Referencial Euleriano).

## 1.2. Teoria de Onda de Stokes de Segunda Ordem

A teoria proposta por Stokes mostrou que a elevação da superfície de uma onda em águas profundas pode ser expandida com uma série de potências de amplitude  $\zeta$ . WHITHAM (2011), Equação 9.

$$\eta = \zeta \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} k \zeta^2 \cos(2(kx - \omega t)) + \frac{3}{8} k^2 \zeta^3 \cos(3(kx - \omega t)) + \dots \quad (9)$$

A teoria de onda de segunda ordem considera até o termo de ordem 2 na expansão. As expressões de cinemática das partículas são apresentadas nas equações 10, 11, 12 e 13 na seguinte ordem: Velocidade horizontal  $u$ , velocidade vertical  $w$ , aceleração horizontal  $\dot{u}$ , e aceleração vertical  $\dot{w}$ .

$$u = \frac{\pi H \cosh(k(z+h))}{T \sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2 \cosh(2k(z+h))}{4TL \sinh^4(kh)} \cdot \cos(2(kx - \omega t)) \quad (10)$$

$$w = \frac{\pi H \sinh(k(z+h))}{T \sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3(\pi H)^2 \sinh(2k(z+h))}{4TL \sinh^4(kh)} \cdot \sin(2(kx - \omega t)) \quad (11)$$

$$\dot{u} = \frac{2\pi^2 H \cosh(k(z+h))}{T^2 \sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3\pi^3 H^2 \cosh(2k(z+h))}{T^2 L \sinh^4(kh)} \cdot \sin(2(kx - \omega t)) \quad (12)$$

$$\dot{w} = \frac{-2\pi^2 H \sinh(k(z+h))}{T^2 \sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \omega t) - \frac{3\pi^3 H^2 \sinh(2k(z+h))}{T^2 L \sinh^4(kh)} \cdot \cos(2(kx - \omega t)) \quad (13)$$

Segundo SALMON (2008) as ondas não-lineares de Stokes possuem cristas mais nítidas e vales mais planos que as ondas do modelo linear, o que por sua vez resulta em uma descrição mais realista de ondas com grandes amplitudes.

## 1.3. Equação de Morison

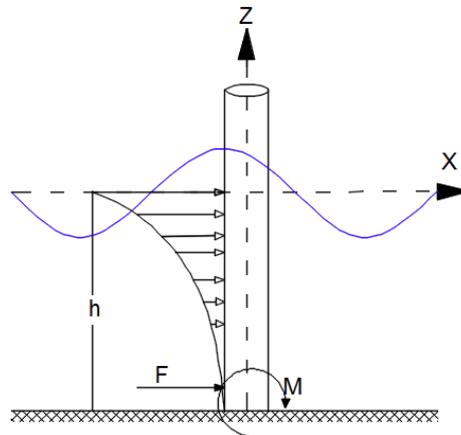
É possível estimar a força que o impacto das ondas gera sobre a estrutura quando são conhecidos os campos vetoriais que descrevem o escoamento do fluido.

A equação 14, proposta por Morison, é utilizada para estimar a força exercida por ondas superficiais em um cilindro perpendicular à direção do fluxo. Ela é composta pela soma de dois termos: força inercial e força de arrasto.

A força inercial é diretamente proporcional às acelerações horizontais do fluido, representadas por  $\frac{\partial u}{\partial t}$ , enquanto a força de arrasto é proporcional em intensidade ao quadrado da velocidade horizontal das partículas do fluido, representado por  $u \cdot |u|$ . As constantes  $\rho$  e  $D$  correspondem respectivamente a densidade do fluido e diâmetro do cilindro, enquanto  $C_m$  e  $C_D$  são, respectivamente, os coeficientes de inércia e de arrasto. Estes coeficientes estão relacionados ao grau de rugosidade da superfície e forma do cilindro e são obtidos através de análises experimentais.

Em um escoamento gerado por ondas superficiais, o perfil de velocidades e acelerações horizontais varia de forma exponencial ao longo da profundidade  $h$ . Sendo assim, a força atuante ao longo do cilindro assumirá também um perfil exponencial, conforme representado na Figura 3.

Figura 3 - Elemento de seção circular perpendicular à direção de escoamento.



Fonte: Autores 2021

$$F = C_m \left( \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \right) \frac{\partial u}{\partial t} + C_D \cdot \rho \frac{D}{2} u \cdot |u| \quad (14)$$

#### 1.4. Vibração Forçada Amortecida

Quando um sistema está sujeito à ação de uma força externa  $F(t)$ , periódica ou não, a vibração é dita forçada. Estruturas reais estão sujeitas a perda de energia mecânica a partir do fenômeno do amortecimento. A uma dissipação de energia proporcional à velocidade chamamos amortecimento viscoso. A consideração do fenômeno de amortecimento e da ação de uma força externa pode ser matematicamente descrita na equação de equilíbrio como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (15)$$

Onde:  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{K}$  representam, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema estrutural.  $\ddot{\mathbf{U}}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}$  e  $\mathbf{U}$  são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente.  $\mathbf{F}(t)$  é o

vetor de forças externas que gera uma excitação na estrutura variável conforme o tempo  $t$ . A equação 15 é conhecida como Equação de Equilíbrio Dinâmico.

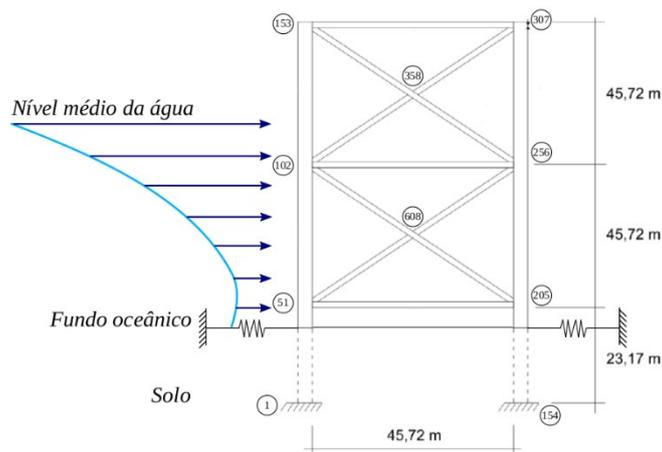
## II. METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizadas análises sobre a resposta estrutural de uma plataforma fixa do tipo jaqueta. As teorias de onda utilizadas foram as teorias linear de Airy e Stokes de Segunda Ordem. As dimensões, propriedades mecânicas e geométricas, assim como as informações de estado de mar foram obtidas utilizando como referência os trabalhos de ZRIBI et. al (2004), MOHAN et. al (2013) e SILVA (2014).

### 2.1 Simulação 1

A Figura 4 apresenta o modelo da jaqueta da plataforma estudada. Os elementos que compõem a estrutura são de aço (Módulo de Young  $E = 210 \text{ GPa}$  e massa específica  $\rho = 7730,7 \text{ kg/m}^3$ ). A massa da superestrutura (*deck*) suportada pela jaqueta é de 680.390 kg. A Tabela 1 apresenta as propriedades geométricas dos membros da estrutura.

Figura 4 - Desenho esquemático: Modelo de plataforma fixa do tipo jaqueta utilizado na simulação 1.



Fonte: Autores, 2021.

Tabela 1 - Propriedades Geométricas dos membros da estrutura. Simulação 1.

Membros	Diâmetro Externo (m)	Diâmetro Interno (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Momento de Inércia (m <sup>4</sup> )
Verticais	1,22	1,14	0,141	0,02301
Horizontais	0,61	0,59	0,023	0,00096
Diagonais	0,61	0,59	0,023	0,00096

No modelo adotado, a estrutura encontra-se fixa ao solo através de pilares enterrados. Assume-se que estes estão totalmente engastados na ponta, situada a 23,17 m abaixo do leito oceânico. A fim de considerar algum nível de interação entre o solo e a estrutura, admitiu-se a existência de uma rigidez translacional horizontal na cota do fundo

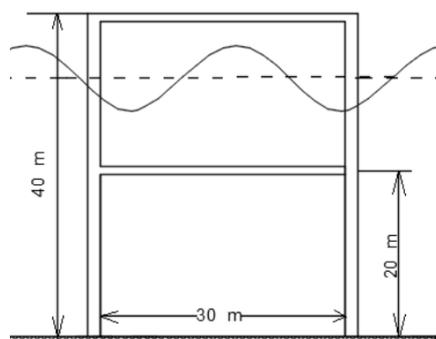
marinho. Esta rigidez é representada através de um elemento de mola com rigidez elevada, Figura 4.

O estado de mar simulado é composto por uma única onda de projeto com as seguintes características: 12,19 m de altura, 182,88 m de comprimento e profundidade média local de 76,20 m. Os períodos de onda simulados foram obtidos a partir do trabalho de SILVA (2014) e são 1,79 segundos (0,5573 Hz) e 0,55 segundos (1,80 Hz).

## 2.2 Simulação 2

A Figura 5 apresenta o modelo da jaqueta estudada na simulação 2. Todos os elementos estruturais são de aço (Módulo de Young  $E = 210 \text{ GPa}$  e massa específica  $\rho = 7730,7 \text{ kg/m}^3$ ). Os pilares encontram-se perfeitamente engastados em uma base plana e indeslocável. As dimensões da jaqueta assim como as propriedades geométricas de seus membros são baseadas no trabalho de MOHAN et. al (2013). A massa da superestrutura é de 35227 toneladas MOHAN et. al (2013). As dimensões dos elementos estruturais da plataforma estão na Tabela 2 .

Figura 5 - Desenho Esquemático: Modelo de plataforma fixa do tipo jaqueta utilizado na simulação 2.



Fonte: Autores, 2021

Tabela 2 - Dimensões dos membros da estrutura. Simulação 2

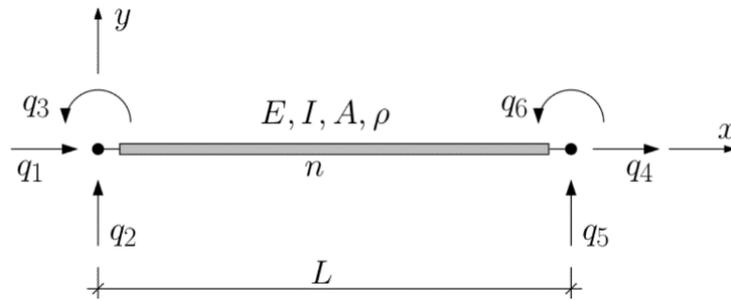
Membros	Diâmetro Externo (mm)	Espessura mm
Verticais	1500	40
Horizontais	1000	40

O estado de mar é composto por uma onda centenária para a Bacia de Campos obtida por SANTOS (2006) com as seguintes características: Comprimento de Onda  $L = 244,46 \text{ m}$ , período  $T = 15,55 \text{ segundos}$ , altura  $H = 7.84 \text{ m}$ , profundidade local  $h = 32 \text{ m}$ .

## 2.3 Esquema de Resolução

A discretização da estrutura foi feita utilizando elementos do tipo pórtico plano, Figura 6. Este elemento possui seis graus de liberdade: quatro associados à translação e dois à rotação.

Figura 6 - Elemento de pórtico plano. Possui 6 graus de liberdade, 4 translacionais e 2 rotacionais.



A matriz de rigidez do pórtico plano é dada por:

$$K^e = \frac{E}{L^3} \begin{bmatrix} AL^2 & 0 & 0 & -AL^2 & 0 & 0 \\ 0 & 12I & 6IL & 0 & -12I & 6IL \\ 0 & 6IL & 4IL^2 & 0 & -6IL & 2IL^2 \\ -AL^2 & 0 & 0 & AL^2 & 0 & 0 \\ 0 & -12I & -6IL & 0 & 12I & -6IL \\ 0 & 6IL & 2IL^2 & 0 & -6IL & 4IL^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

A força hidrodinâmica foi calculada através da equação de Morison, Equação 14, utilizando as velocidades e acelerações fornecidas pelas teorias de onda linear de Airy e Stokes de segunda ordem, equações 5, 7, 10 e 12. Os coeficientes de inércia e arrasto foram definidos com base na recomendação da RP-2A-WSD API (2000) para cilindros rugosos como sendo  $C_D = 1.05$  e  $C_m = 1.2$ .

A força atuante sobre os elementos verticais perpendiculares à direção de fluxo, foi calculada como uma carga uniformemente distribuída  $q_0$  sobre cada elemento finito de comprimento  $L$ . A partir desta consideração o vetor de forças locais é construído atribuindo valores nodais, conforme a equação 17.

$$F^e = \frac{q_0 L}{12} \begin{bmatrix} 0 \\ 6 \\ L \\ 0 \\ 6 \\ -L \end{bmatrix} \quad (17)$$

Neste trabalho adotou-se a matriz de massa consistente apresentada a seguir na equação 18.

$$M^e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

O fenômeno do amortecimento é expresso através da matriz de amortecimento de Rayleigh no sistema de coordenadas modais, equação 19, onde  $\xi$  é a taxa de amortecimento estrutural (adotada  $\xi = 1\%$ ) e  $\omega$  é a frequência natural.

$$C_{modal} = 2\xi\omega[M_{modal}] \quad (19)$$

Tendo definido as matrizes de massa (18), rigidez (16) e amortecimento (19) que modelam a plataforma real, buscou-se a solução numérica da equação de equilíbrio dinâmico discretizada, equação 15, através de um código implementado em *Matlab*®. As propriedades dinâmicas da plataforma (frequência naturais e modos de vibração) foram obtidas através de análise modal. A partir destas propriedades selecionou-se os modos de interesse a fim de reescrever o problema através das matrizes no referencial modal. O Método de Newmark foi utilizado para solucionar a equação de equilíbrio ao longo do tempo. O tempo de simulação adotado foi de 30 segundos uniformemente discretizado em passos de 0,01 segundos.

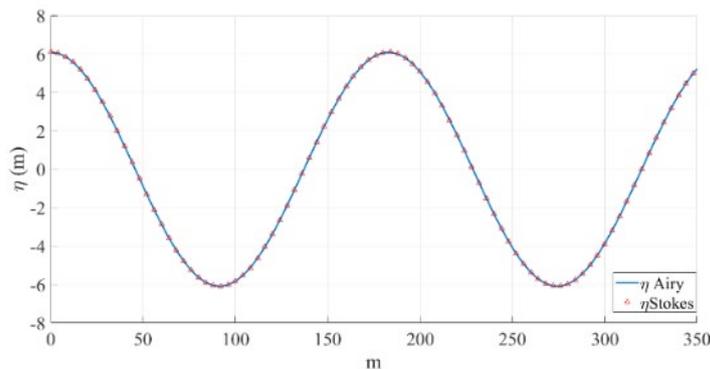
### III. RESULTADOS

#### 3.1 Simulação 1

##### 3.1.1 Elevação da superfície oceânica

A Figura 7 mostra, para o estado de mar descrito na simulação 1, o perfil de elevação da superfície oceânica em um instante específico de tempo  $\eta(x, t)$ . É possível perceber que os resultados da Teoria Linear de Airy e de Stokes de Segunda Ordem não apresentaram diferenças significativas entre si.

Figura 7 - Elevação da superfície oceânica. Simulação 1.

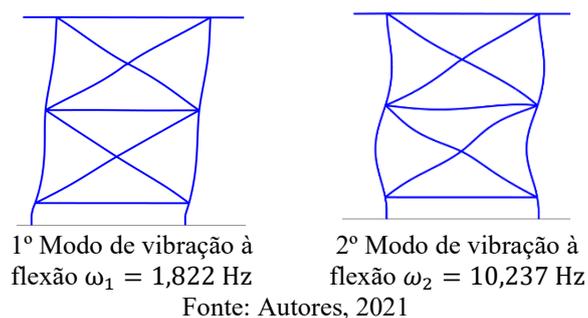


Fonte: Autores, 2021.

##### 3.1.2 Modos de vibração e frequências naturais

A Figura 8 apresenta os dois primeiros modos de vibração à flexão da plataforma. As frequências associadas ao primeiro e segundo modo são 1,822 Hz e 10,237 Hz.

Figura 8 - Primeiro e segundo modos de vibração à flexão.

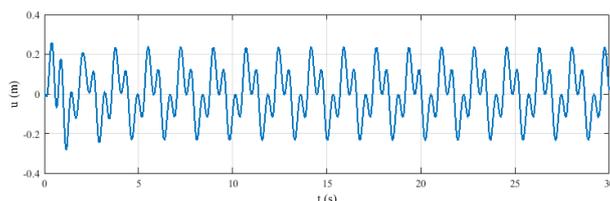


Para a primeira frequência natural da jaqueta a diferença percentual entre o resultado obtido via simulação computacional e o trabalho de ZRIBI et. al (2004) foi de 0,2%.

### 3.1.3 Resposta Estrutural

A Figura 9 apresenta a resposta estrutural no domínio do tempo. Neste gráfico é possível ver os deslocamentos de um ponto localizado no nível mais elevado da jaqueta. Este ponto corresponde a cota onde é acoplado o *deck* com os módulos de operação e alojamento da plataforma.

Figura 9 - Deslocamento horizontal. Frequência de excitação  $f = 0,5573$  Hz.



Fonte: Autores, 2021.

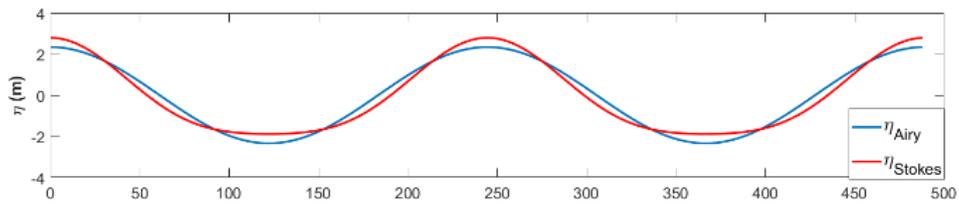
O deslocamento horizontal máximo do ponto mais elevado da estrutura foi de 0,2715 m, que ao ser comparado com o trabalho de SILVA (2014) apresentou uma diferença percentual de 4%. As diferenças nas frequências e deslocamentos provavelmente estão relacionadas às diferentes considerações feitas por cada autor com relação à vinculação da estrutura e discretização do modelo.

## 3.2 Simulação 2

### 3.2.1 Elevação da superfície Oceânica e Força Hidrodinâmica

A Figura 10 apresenta o perfil de elevação oceânica para o estado de mar da simulação 2. É visível a diferença nos resultados obtidos pelas teorias linear de Airy e de Stokes de segunda ordem. O perfil de onda obtido a partir do modelo de Stokes possui uma inclinação mais acentuada (chamada de *wave steepness* -  $H/L$ ).

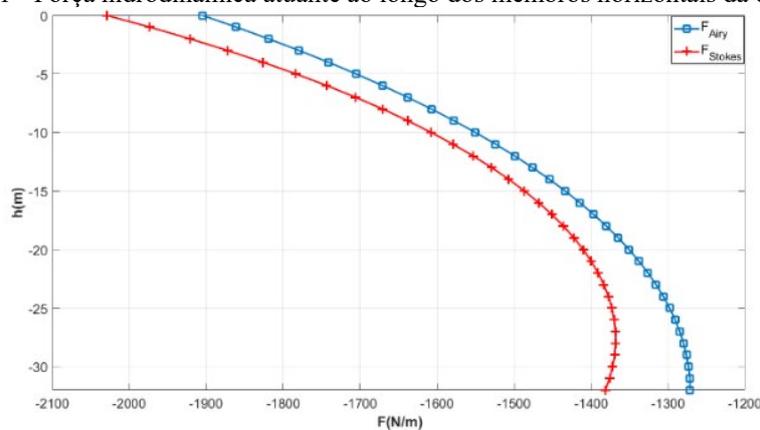
Figura 10 - Perfil de elevação oceânica. Simulação 2.



Fonte: Autores, 2021

A Figura 11 mostra a força hidrodinâmica atuante sobre a estrutura em um instante de tempo  $t = 5$  segundos. Para o estado de mar considerado, a diferença entre os valores máximos de força calculados a partir das teorias de onda foi de 26,23 %.

Figura 11 - Força hidrodinâmica atuante ao longo dos membros horizontais da estrutura.

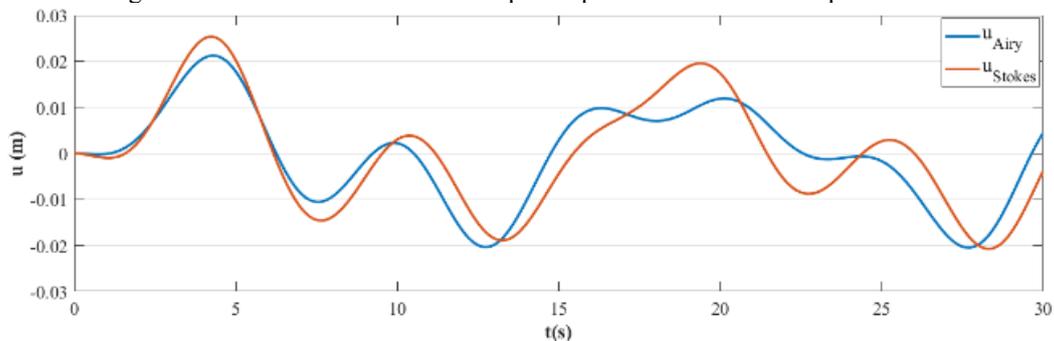


Fonte: Autores, 2021

### 3.2.2 Resposta Estrutural

A Figura 12 apresenta o deslocamento de um ponto no nível mais elevado da estrutura. A primeira frequência natural da estrutura é  $\omega_1 = 0,168Hz$  enquanto a segunda frequência é  $\omega_2 = 1,136Hz$ . Frequências naturais baixas e deslocamentos inferiores aos observados na simulação 1 foram encontrados. Isto decorre da elevada massa da superestrutura que associada à não existência de contraventamentos diagonais torna a estrutura menos rígida e mais pesada.

Figura 12 - Deslocamento horizontal para o ponto mais elevado da plataforma.

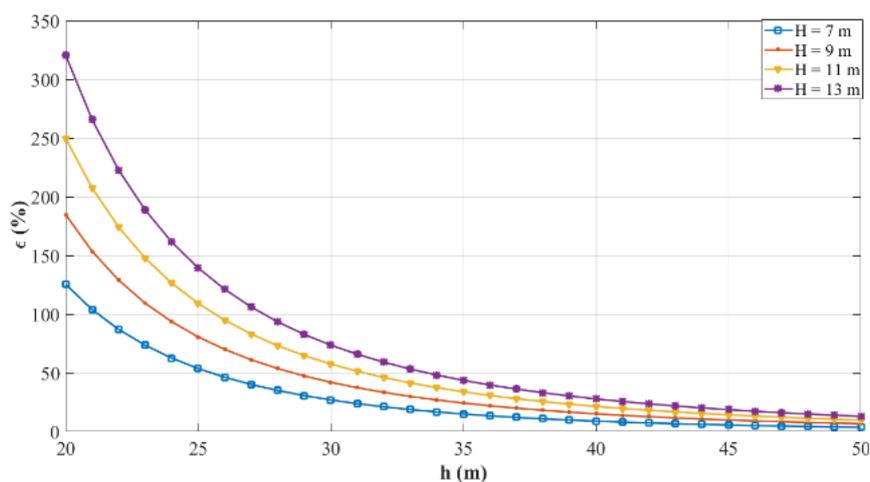


Fonte: Autores, 2021.

### 3.3 Estados de Mar Diversos

A Figura 13 apresenta a diferença percentual entre a máxima força hidrodinâmica obtida para diferentes profundidades  $h$  e alturas de ondas  $H$ . Pode-se observar que a diferença na força hidrodinâmica calculada através das teorias converge para zero à medida que a profundidade local aumenta. Isto ocorre sempre que a relação entre a amplitude de onda e profundidade local é pequena, o que contribui para minoração dos termos de ordem mais elevados da teoria não linear de Stokes.

Figura 13 - Simulação para diversos estados de mar. Avaliação da relação entre altura de onda e profundidade local.



Fonte: Autores, 2021

## IV. CONCLUSÃO

Para a simulação 1 o modelo computacional implementado apresentou bons resultados quando comparado aos modelos de referência. Com relação às teorias de onda, na simulação 1, não foi possível obter resultados que evidenciassem claramente as diferenças entre as teorias de onda.

Os resultados da simulação 2 tornaram claras as diferentes ações hidrodinâmicas atuantes sobre a estrutura ao adotarmos a teoria linear e não-linear. Com uma diferença percentual de 26,23% entre os valores máximos, fica evidente a necessidade de escolha apropriada da teoria de onda que irá descrever o estado de mar. Também é notável a contribuição da elevada massa da superestrutura no controle das vibrações. As baixas frequências naturais encontradas na simulação 2 mostram a necessidade de enrijecimento da estrutura.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API. **Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design: Upstream Segment. API Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD):** Errata and Supplement 1, December 2002. American Petroleum Institute, 2000

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Agosto 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp>. Acesso: 15 out. 2021

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021**, Base 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso: 15 out. 2021

HSM Offshore. Figura 1. Disponível em: <https://www.hsmoffshore.com/en/projects/oil--gas/platforms/a18-satellite-platform/>. Acesso: 06 de out. 2021.

MOHAN, Poonam; SIDHAARTH, KR Aswin; SANILKUMAR, V. **Modeling and analysis of offshore jacket platform**. 2013.

REEVE, Dominic; CHADWICK, Andrew; FLEMING, Christopher. **Coastal engineering: processes, theory and design practice**. CRC Press, 2018.

SALMON, Rick. Introduction to ocean waves. **Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego**, 2008.

SANTOS, Augusto Antunes dos. **Projeto estrutural de uma Jaqueta para Plataforma de Manutenção de Aeronaves na Bacia de Campos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2006.

SILVA, Luciano da. **Análise modal e controle de plataformas offshore sujeitas a perturbações persistentes**. 2014.

WHITHAM, Gerald Beresford. **Linear and nonlinear waves**. John Wiley & Sons, 2011.

ZRIBI, Mohamed et al. **Nonlinear and robust control schemes for offshore steel jacket platforms**. *Nonlinear Dynamics*, v. 35, n. 1, p. 61-80, 2004.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - projeto “311576 / 2018-4 PQ”), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa - projeto “PPM-00106-17”), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), PGMC-UFJF (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional) e UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora).

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***IRRADIANCE AND TEMPERATURE ESTIMATION IN A TYPICAL PHOTOVOLTAIC SYSTEM***

### ***ESTIMAÇÃO DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO TÍPICO***

João Marcos dos Santos Souza<sup>1</sup>  
Cassius Zanetti Resende<sup>2</sup>  
Wagner Teixeira da Costa<sup>3</sup>

***Resumo – A energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos (PV) depende dos parâmetros de irradiância e temperatura do ambiente. Alguns métodos de Seguidores do Ponto de Máxima Potência (MPPT, do inglês Maximum Power Point Trackers) utilizam estes parâmetros para que o ponto de operação da curva característica ocorra no ponto de potência máxima, contribuindo para que o sistema de energia solar atue de forma mais eficiente possível. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um estimador das medidas de irradiância e temperatura através da varredura do ponto de operação da curva característica da corrente versus tensão (I-V) de um módulo fotovoltaico. Tais grandezas estimadas poderão ser empregadas como parâmetros de entrada dos MPPT, reduzindo a necessidade de sensores físicos.***

***Palavras-chave: Estimação de Irradiação Solar. Estimação de Temperatura de Célula PV. Módulo PV como Sensor.***

***Abstract - The energy generated by photovoltaic (PV) systems depends on the irradiance and temperature parameters of the environment. Some methods of Maximum Power Point Trackers (MPPT) use these parameters so that the operating point of the characteristic curve occurs at the maximum power point, contributing to the energy system solar act as efficiently as possible. This work proposes the development of an estimator of irradiance and temperature measurements by scanning the operating point of the current versus voltage (I-V) characteristic curve of a***

<sup>1</sup> Instituto Federal do Espírito Santo - IFES. Contato: 86joaomarcos@gmail.com;

<sup>2</sup> Instituto Federal do Espírito Santo - IFES. Contato: cassiusresende@gmail.com;

<sup>3</sup> Instituto Federal do Espírito Santo - IFES. Contato: wagnercosta@ifes.edu.br

*photovoltaic module. Such quantities are estimated to be used as input parameters of MPPT, reducing the need for physical sensors.*

***Keywords: Solar irradiation estimation. PV cell temperature estimation. PV module as a sensor.***

## I. INTRODUÇÃO

A geração de energia limpa se torna cada vez mais necessária com a crescente preocupação com o meio ambiente. O governo alemão propôs uma das maiores reestruturações de qualquer grande economia, já que planeja reduzir as emissões de carbono em 65% dos níveis de 1990 até 2030 e atingir a neutralidade climática com emissão zero de gás carbônico até 2045 (DW, 2021). As metas climáticas da Alemanha só serão alcançadas com a expansão massiva da energia fotovoltaica, sendo necessária uma capacidade adicional de pelo menos 10 Gigawatts por ano até 2030 (MEZA, 2021). No Brasil, de janeiro a junho de 2021, a geração fotovoltaica adicionou 1.450 megawatts (MW) em capacidade instalada, o que representa um crescimento de 30% frente ao histórico consolidado até o final de 2020 (GREENER, 2021).

Em face da criticidade da necessidade de medição dos parâmetros do módulo fotovoltaico com uso de medidores de irradiância e temperatura para aplicação de alguns métodos MPPT, torna-se oportuno implementar o estimador de irradiância e temperatura, o qual eliminaria a imprescindibilidade do uso de instrumentos de medição que podem ter problemas quanto a interferência na alteração da acurácia, precisando de constante calibração.

A literatura recente apresenta estudos para estimá-los por meio de medidas elétricas. Moshksar e Ghanbari (2018) estimam a irradiância a partir dos valores de corrente, tensão e informações do datasheet do fabricante, não apresentando precisão em condições de baixas irradiâncias e altas temperaturas. Carrasco, Mancilla-David e Ortega (2014) e Cristaldi et al. (2014) propõem a estimativa da irradiância a partir das medições da corrente, tensão e temperatura do módulo fotovoltaico. Tan, Tai e Mok (2013) necessitam da medição da corrente de curto-circuito para estimativa da irradiância usando o modelo matemático do módulo fotovoltaico baseado na identificação do fator de idealidade do diodo e da resistência em série. Zečević e Rolevski (2020) usam as medições de corrente, tensão e temperatura do módulo fotovoltaico para estimativa da irradiância através de redes neurais.

Outros estudos foram propostos para estimar temperatura através dos módulos fotovoltaicos. Barykina e Hammer (2017) estimam a temperatura a partir dos valores das medições de irradiância, temperatura ambiente e da velocidade do vento. Skoplaki, Boudouvis e Palyvos (2008) e Mattei et al. (2006) usam equação de balanço energético, juntamente com as medições de irradiância e temperatura ambiente para estimar a temperatura do módulo fotovoltaico. E, para estimar tanto a irradiância quanto a temperatura, outros trabalhos necessitam dos valores da medição da tensão de circuito

aberto e da corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico (RIVERA; PENG, 2006; COSTA et al., 2014).

Este trabalho descreve a estimativa da irradiância e da temperatura baseado no Estimador GT proposto por Da Costa (2010). Estas estimativas serão obtidas a partir da medição da corrente e da tensão de saída do módulo fotovoltaico baseado no modelo de resistência em paralelo.

## II. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta modelagens utilizadas no ambiente Simulink® do *software* Matlab® para a composição do sistema fotovoltaico típico. Este processo de geração de energia solar foi simulado com o modelo do módulo fotovoltaico com resistência em paralelo. Ademais, é apresentada a metodologia do estimador de irradiância e temperatura.

### 2.1 – Modelagem Matemática do Módulo Fotovoltaico

As características elétricas do diodo podem representar a junção p-n da célula fotovoltaica. Assim, segundo Dileep e Singh (2017), modelos fotovoltaicos baseados em circuitos elétricos que utilizam diodos são: modelo ideal, com resistência em série, com resistência em paralelo e com dois diodos.

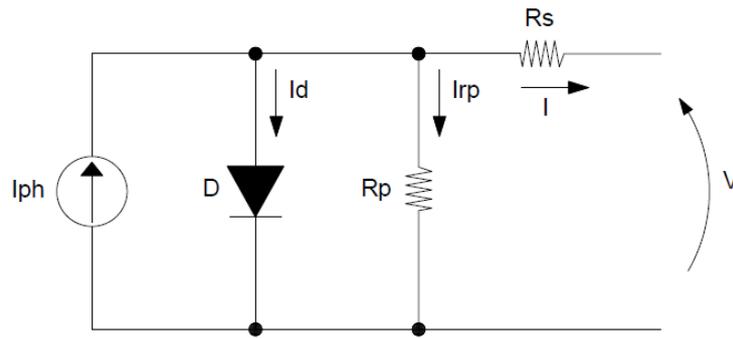
Segundo Heringer (2016), a corrente em um diodo  $I_d$  no modelo de módulo fotovoltaico é descrita pela Eq. (1):

$$I_d = I_0 \cdot \left[ e^{\frac{qV_d}{n_s m k T_c}} - 1 \right] \quad (1)$$

Na Eq. (1),  $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo de difusão,  $q$  é carga elementar do elétron ( $1,609 \cdot 10^{-19}$  C),  $V_d$  a tensão nos terminais do diodo,  $n_s$  é o número de células em série do módulo fotovoltaico,  $m$  corresponde ao fator de idealidade do diodo,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K) e  $T_c$  refere-se a temperatura do módulo.

No modelo do módulo fotovoltaico com resistência em paralelo mostrado na Figura 1, as perdas dos contatos metálicos e do material semicondutor dos módulos fotovoltaicos são representadas por uma resistência em série ( $R_s$ ). Também é inserida uma resistência em paralelo ( $R_p$ ) que representa perdas devidas as correntes parasitas que circulam o módulo fotovoltaico. A fonte de corrente mostrada na Figura 1 representa a corrente fotogerada pelo módulo ( $I_{ph}$ ).

Figura 1 - Circuito equivalente do modelo com resistência em paralelo



Fonte: Autores, 2021.

Considerando a corrente do diodo obtida pela Eq. (1), a tensão de saída do módulo ( $V$ ) e analisando as correntes da Figura 1, temos a corrente de saída do módulo ( $I$ ) sendo expressa pela Eq. (2):

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_s m k T_c}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

A corrente foto gerada ( $I_{ph}$ ) varia de acordo com a irradiância incidida no módulo ( $G_c$ ) e a temperatura do módulo ( $T_c$ ), podendo ser expressa pela Eq. 3 (COSTA, 2010).

$$I_{ph}(G_c, T_c) = \frac{G_c}{G_r} [I_{ccr} - \alpha(T_c - T_r)] \quad (3)$$

Na Eq. (3),  $G_r$  é a irradiância de referência ( $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $I_{ccr}$  é a corrente de curto-circuito na condição padrão de teste fornecida pelo fabricante,  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito dado em  $\text{A/K}$  e  $T_r$  corresponde a temperatura de referência ( $298,15 \text{ K}$ ).

O valor aproximado da corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) da saída do módulo fotovoltaico pode ser obtido a partir da Eq. (3) e desconsiderando as perdas representadas pela resistência em série, resultando na Eq. (4).

$$I_{cc} \approx I_{ph}(G_c, T_c) \quad (4)$$

A tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ) também é influenciada pela irradiância e temperatura, podendo ser expressa pela Eq. 5 (COSTA, 2010).

$$V_{ca}(G_c, T_c) = V_{car} + \beta(T_c - T_r) + \ln\left(\frac{G_c}{G_r}\right) \quad (5)$$

Onde  $V_{car}$  da Eq. (5) refere-se a tensão de circuito aberto com  $G_r = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T_r = 298,15 \text{ K}$ . E  $\beta$  é o coeficiente de temperatura para tensão de circuito aberto dado em V/K.

Foram usados os dados mostrados na Tabela 1 do módulo policristalino de alta eficiência KC50T da *Kyocera*® (KYOCERA®, 2021) para o modelo com resistência em paralelo.

Tabela 1 - Dados do fabricante do módulo KC50T da *Kyocera*®.

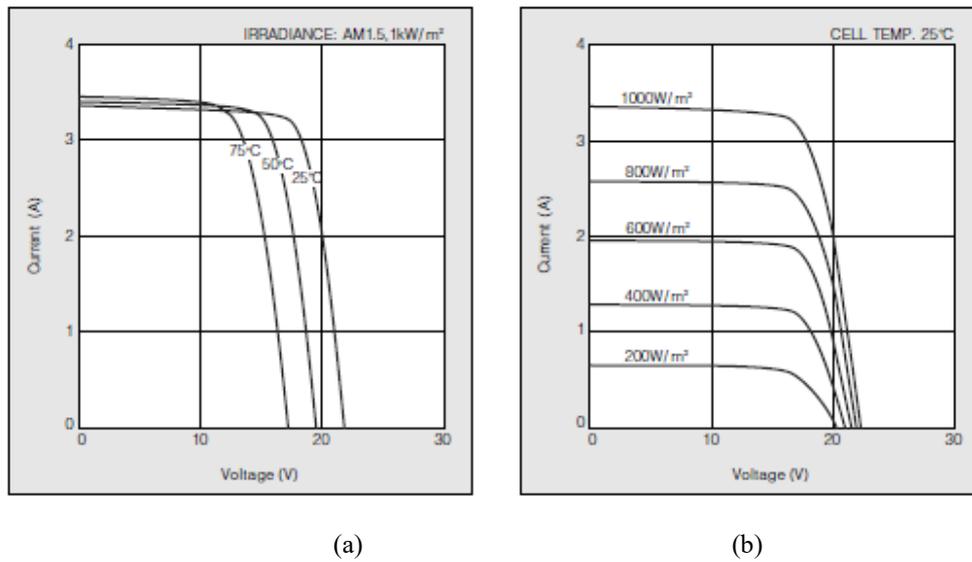
Corrente de Curto-Circuito - $I_{ccr}$	3,31 A
Tensão de Circuito Aberto - $V_{car}$	21,7 V
Máxima potência - $P_m$	54 W
Corrente de máxima potência - $I_m$	3,11 A
Tensão de máxima potência - $V_m$	17,4 V
Número de células em série - $n_s$	36
Coeficiente de temperatura $I_{cc} - \alpha$	$1,33 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura $V_{ca} - \beta$	$-8,21 \times 10^{-2} \text{ V/}^\circ\text{C}$
Tolerância	+15% / -5%

## 2.2 – Estimador de Irradiância e Temperatura

O Estimador GT (G – irradiância, T – temperatura) promove a estimação dos valores de irradiância e temperatura a partir das características elétricas da saída do módulo fotovoltaico. Este estimador promove a varredura da curva característica IxV do módulo tanto para condição de curto-circuito, para medir a irradiância, quanto para a condição de circuito aberto, para medir a temperatura.

As curvas características IxV do módulo fotovoltaico módulo policristalino de alta eficiência KC50T da *Kyocera*® (KYOCERA, 2021) são mostradas na Figura 2, onde na Figura 2(a) é mantida a irradiância constante de  $1.000 \text{ W/m}^2$  e na Figura 2(b) é mantida a temperatura constante de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pode ser observado na Figura 2 que a corrente de curto-circuito sofre bastante influência da variação da irradiância e pouca influência na variação de temperatura. Dessa forma, desconsiderado o efeito da temperatura na Eq. (3) e tendo em conta a Eq. (4), se obtém a expressão da Eq. (6) para a estimativa da irradiância na condição em que o ponto de operação permite a medição da corrente de curto-circuito.

Figura 2 - Curvas características do módulo KC50T da Kyocera



Fonte: Kyocera, 2020.

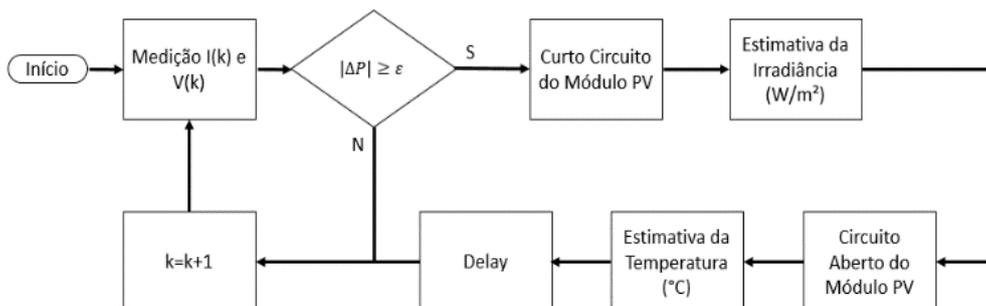
$$G_c = \frac{I_{cc}}{I_{ccr}} G_r \quad (6)$$

Com o valor da irradiância obtido, é possível estimar a temperatura do módulo fotovoltaico a partir da Eq. (5) que pode ser manipulada e apresentada conforme Eq. (7).

$$T_c = \frac{V_{ca} - V_{car} - \ln\left(\frac{G_c}{G_r}\right)}{\beta} + T_r \quad (7)$$

O algoritmo do bloco calcula os valores de irradiância e temperatura com o princípio de funcionamento, mostrado no fluxograma apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do funcionamento do Estimador GT



Fonte: Autores, 2021.

Na sequência, será apresentado os passos lógicos do estimador.

Passo 1) Realiza as medidas de corrente e tensão de saída do módulo, isto é, mede  $I(k)$  e  $V(k)$ .

Passo 2) A partir das medidas de  $I(k)$  e  $V(k)$  é calculada a potência. Nesta etapa é verificado se houve variação de potência da saída do módulo fotovoltaico igual ou superior ao valor estabelecido de tolerância  $\epsilon$ , isto é, se  $|\Delta P| \geq \epsilon$ . Em caso afirmativo, inicia-se a varredura com alteração do ponto de operação para a estimação da irradiância.

Passo 3) Altera-se o ponto de operação para o início da curva característica para obter a leitura do valor da corrente de curto-circuito nos terminais de saída do módulo fotovoltaico.

Passo 4) Obtido o valor da corrente de curto-circuito, a irradiância estimada é calculada com a expressão da Eq. (6).

Passo 5) Estimada a irradiância, altera-se o ponto de operação para a tensão de circuito aberto, isto é, o final da curva para a obter a medição de  $V_{ca}$ .

Passo 6) Com o valor medido da tensão de circuito aberto, é calculada a temperatura estimada conforme descrito na Eq. (7).

Passo 7) Na etapa “Delay”, o MPPT entra em funcionamento e muda o ponto de operação para máxima potência com os novos valores de irradiância e temperatura. Esta variação de potência sem o tempo de espera (*delay*) acarretaria em nova estimação de temperatura e irradiância neste instante, repetindo sempre o ciclo, voltando para o passo 3. Dessa forma, é necessário este tempo de espera para que o algoritmo retorne para o passo 1 esperando a ocorrência de uma variação de potência durante a atuação do MPPT.

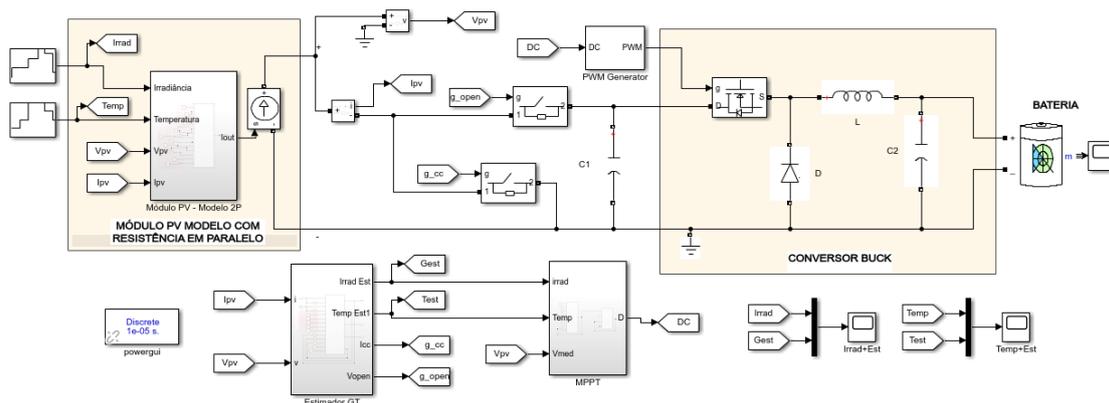
Passo 8) Vai para o próximo instante:  $k = k+1$ .

### III. RESULTADOS

O sistema fotovoltaico mostrado na Figura 4 foi realizado no ambiente Simulink® do Matlab® para as simulações. Este sistema típico é composto pelo bloco do módulo fotovoltaico, pelo bloco do Estimador GT, pelo bloco do método MPPT, pelo conversor Buck e uma bateria como carga. Foi usado o modelo com resistência em paralelo representando o módulo fotovoltaico KC50T da Kyocera® (KYOCERA®, 2021).

As simulações foram divididas da seguinte forma: irradiância variando com temperatura mantida constante, temperatura variando com a irradiância constante e variando tanto a irradiância quanto a temperatura. A varredura do Estimador GT para medir a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto foi realizada através do chaveamento de dois relés.

Figura 4 - Sistema fotovoltaico usado na simulação

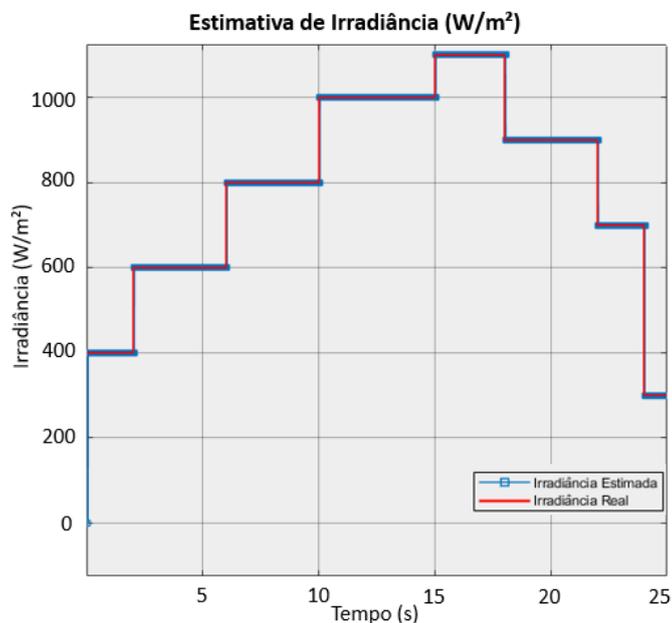


Fonte: Autores, 2021.

### 3.1 – Temperatura Constante e Irradiância Variando

A Figura 5 apresenta o gráfico do resultado da estimativa da irradiância. Neste caso foi considerada a temperatura constante de 25°C e a irradiância variando.

Figura 5 – Estimativa da irradiância para a simulação variando a irradiância e mantendo a temperatura constante, com os valores estimados representados pela cor azul e os valores de referências na cor vermelha



Fonte: Autores, 2021.

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram os valores estimados obtidos na simulação para a irradiância e para a temperatura, respectivamente. Como pode ser verificado na Tabela 2, o maior valor percentual do erro é de 0,01% para todas as estimativas da irradiância. Pode ser notado na Tabela 3 que desvio percentual para a estimativa da temperatura

aumenta quanto menor for o valor da irradiância, assim o maior erro percentual é de 0,74% que ocorre durante estimativa no intervalo de 24 a 25 segundos.

Tabela 2 – Resultados estimados da irradiância para a simulação variando a irradiância e mantendo a temperatura constante.

Intervalo (s)	Irradiância e temperatura de referência	Irradiância estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0 - 2	400 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	399,9619	0,01
2 - 6	600 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	599,9425	0,01
6 - 10	800 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	799,9228	0,01
10 - 15	1000 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	999,9029	0,01
15 - 18	1100 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	1099,8929	0,01
18 - 22	900 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	899,9129	0,01
22 - 24	700 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	699,9327	0,01
24 - 25	300 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	299,9716	0,01

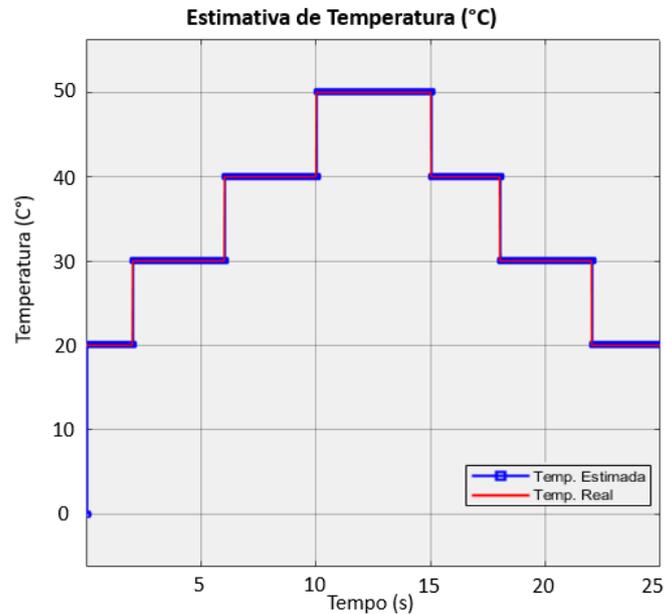
Tabela 3 – Resultados estimados da temperatura para a simulação variando a irradiância e mantendo a temperatura constante.

Intervalo (s)	Irradiância e temperatura de referência	Temperatura estimada (°C)	Erro (%)
0 - 2	400 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,1403	-0,56
2 - 6	600 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0952	-0,38
6 - 10	800 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0723	-0,29
10 - 15	1000 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0583	-0,23
15 - 18	1100 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0532	-0,21
18 - 22	900 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0646	-0,26
22 - 24	700 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0822	-0,33
24 - 25	300 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,1844	-0,74

### 3.2 – Irradiância Constante e Temperatura Variando

A estimativa da temperatura referente ao gráfico da Figura 6 foi obtida considerando a temperatura variando e a irradiância com o valor constante de 1.000 W/m<sup>2</sup> no intervalo de 25 segundos. A Tabela 4 e Tabela 5 mostram os valores estimados de irradiância e temperatura, respectivamente, obtidos na simulação referente a Figura 6.

Figura 6 – Estimativa da temperatura para a simulação variando a temperatura e mantendo a irradiância constante, com os valores estimados representados pela cor azul e os valores de referências na cor vermelha



Fonte: Autores, 2021.

Pode ser verificado na Tabela 4 que erro percentual da estimativa de irradiância sem manteve em 0,19% para todos os intervalos simulados. Analisando a Tabela 5, pode ser constatado que os maiores erros percentuais na estimativa de temperatura ocorrem nas menores temperaturas de referência. Dessa forma, o maior erro percentual é de 0,41% nos intervalos que a temperatura de referência é de 20 °C.

Tabela 4 – Resultados estimados da irradiância para a simulação variando a temperatura e mantendo a irradiância constante.

Intervalo (s)	Irradiância e Temperatura de referência	Irradiância Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0 - 2	1000 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	1001,9133	-0,19
2 - 6	1000 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	1001,9133	-0,19
6 - 10	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	1001,9133	-0,19
10 - 15	1000 W/m <sup>2</sup> e 50 °C	1001,9133	-0,19
15 - 18	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	1001,9133	-0,19
18 - 22	1000 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	1001,9133	-0,19
22 - 25	1000 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	1001,9133	-0,19

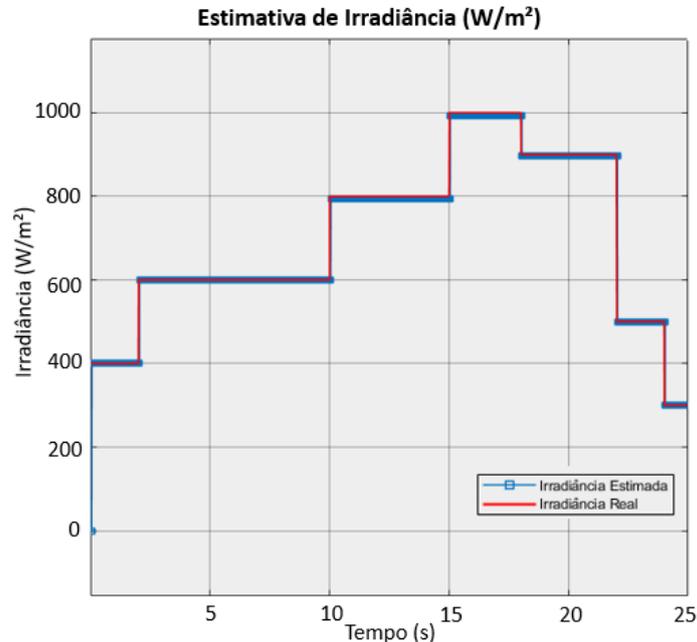
Tabela 5 – Resultados estimados da temperatura para a simulação variando a temperatura e mantendo a irradiância constante.

Intervalo (s)	Irradiância e Temperatura de referência	Temperatura estimada (°C)	Erro (%)
0 - 2	1000 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	20,0829	-0,41
2 - 6	1000 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	30,0828	-0,28
6 - 10	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	40,0826	-0,21
10 - 15	1000 W/m <sup>2</sup> e 50 °C	50,0823	-0,16
15 - 18	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	40,0826	-0,21
18 - 22	1000 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	30,0828	-0,28
22 - 25	1000 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	20,0828	-0,41

### 3.3 – Irradiância e Temperatura Variando

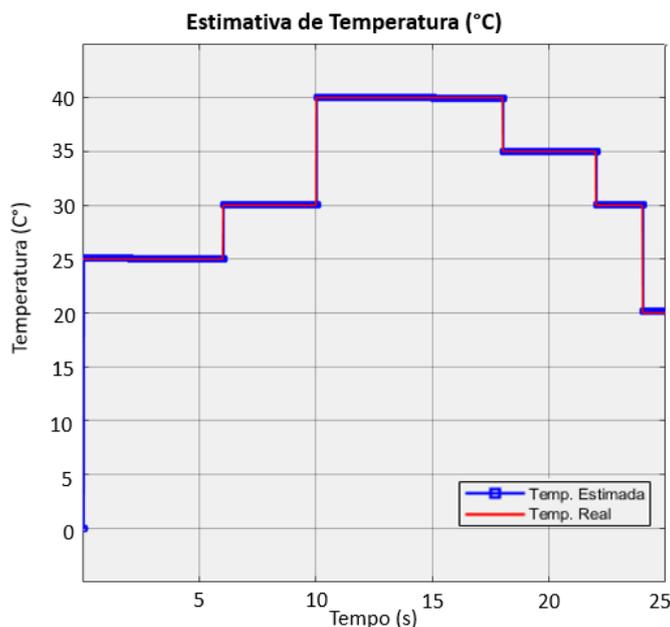
Esta simulação representa uma situação mais próxima da realidade, visto que um sistema fotovoltaico opera, na prática, com diferentes valores de irradiância e temperatura ao longo do dia. A Figura 7 apresenta o gráfico com os resultados da estimativa da irradiância e a Figura 8 mostra o gráfico da estimativa da temperatura.

Figura 7 – Estimativa da irradiância para a simulação variando a irradiância e a temperatura, com os valores estimados representados pela cor azul e os valores de referências na cor vermelha



Fonte: Autores, 2021.

Figura 8 – Estimativa da temperatura para a simulação variando a irradiância e a temperatura, com os valores estimados representados pela cor azul e os valores de referências na cor vermelha



Fonte: Autores, 2021.

A Tabela 6 e a Tabela 7 mostram, respectivamente, os valores estimados de irradiância e de temperatura. Os resultados da estimativa da irradiância mostrados na Tabela 6 apresentaram valores de desvios percentuais inferiores a 0,62%. E o maior erro na estimativa de temperatura foi de 1,05% na condição de 300W/m<sup>2</sup> e 20 °C, conforme pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 6 – Resultados estimados da irradiância para a simulação variando a irradiância e a temperatura.

Intervalo (s)	Irradiância e Temperatura de referência	Irradiância Estimada (W/m <sup>2</sup> )	Erro (%)
0 - 2	400 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	399,9619	0,01
2 - 6	600 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	599,9425	0,01
6 - 10	600 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	599,9425	0,01
10 - 15	800 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	795,0953	0,61
15 - 18	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	993,8673	0,61
18 - 22	900 W/m <sup>2</sup> e 35 °C	896,2928	0,41
22 - 24	500 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	498,9471	0,21
24 - 25	300 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	300,5744	-0,19

Tabela 7 – Resultados estimados da temperatura para a simulação variando a irradiância e a temperatura.

Intervalo (s)	Irradiância e Temperatura de referência	Temperatura estimada (°C)	Erro (%)
0 - 2	400 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,1403	-0,56
2 - 6	600 W/m <sup>2</sup> e 25 °C	25,0952	-0,38
6 - 10	600 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	30,0950	-0,32
10 - 15	800 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	39,9983	0,00
15 - 18	1000 W/m <sup>2</sup> e 40 °C	39,9844	0,04
18 - 22	900 W/m <sup>2</sup> e 35 °C	35,0154	-0,04
22 - 24	500 W/m <sup>2</sup> e 30 °C	30,0887	-0,30
24 - 25	300 W/m <sup>2</sup> e 20 °C	20,2095	-1,05

#### IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou simulações no ambiente *Simulink*® do *Matlab*® de um sistema fotovoltaico típico com estimação dos valores de irradiância e temperatura com uso do Estimador GT.

Foi verificado que o maior desvio percentual do erro da estimativa da irradiância foi de 0,61%, enquanto que o maior erro percentual da temperatura foi de 1,05%.

Portanto, as estimativas obtidas de irradiância e temperatura apresentaram resultados satisfatórios, conforme pode ser verificado pelos baixos valores de erros percentuais. Dessa forma, foi demonstrado, através da simulação de um sistema típico fotovoltaico no *Simulink*®, um bom grau de exatidão quanto a atuação do Estimador GT usando o modelo fotovoltaico com resistência em paralelo.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARYKINA, E.; HAMMER, A. Modeling of photovoltaic module temperature using Faiman model: Sensitivity analysis for different climates. **Solar Energy**, v. 146, p. 401-416, 2017.

CARRASCO, M.; MACILLA-DAVID, F.; ORTEGA, R. An Estimator of Solar Irradiance in Photovoltaic Arrays With Guaranteed Stability Properties. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 61, n. 7, p. 3359-3366, jul. 2014.

COSTA, W. T. da. **Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos**. 2010. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

COSTA, W. T. da. Estimation of irradiance and temperature using photovoltaic modules. **Solar Energy**, v. 110, p. 132-128, 2014.

CRISTALDI, L. et al. An Improved Model-Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panels. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 63, n. 1, jan. 2014.

DEELP, G.; SINGH, S. N. Application of soft computing techniques for maximum power point tracking of SPV system. **Solar Energy**, v. 141, p. 182-202, 2017.

DW. **Germany's more ambitious climate goals pressure industry to clean up – 2021**. Disponível em: <https://www.dw.com/en/germany-climate-emissions-industry-cars-coal/a-57504662>. Acesso em: 7 set. 2021.

GREENER. **Estudo estratégico Geração distribuída – mercado fotovoltaico**. 1º semestre de 2021. Disponível em: [https://greener.greener.com.br/estudo-gd-1s2021/?utm\\_campaign=Estudo-GD-1s2021&utm\\_medium=Estudo&utm\\_source=PDF](https://greener.greener.com.br/estudo-gd-1s2021/?utm_campaign=Estudo-GD-1s2021&utm_medium=Estudo&utm_source=PDF). Acesso em: 7 set. 2021.

HERINGER, N. M. F. **Modelagem de Arranjo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial para Referência de Emuladores Estáticos**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

KYOCERA. **KC50T - HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE**. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/387904/Kyocera-Kc50t.html>. Acesso em: 7 set. 2021.

MATTEI, M. et al. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. **Renewable Energy**, v. 31, p. 553-567, 2006.

MEZA, E. Germany needs major solar PV boom to achieve climate targets – BDEW. **Clean Energy Wire**, 28 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-needs-major-solar-pv-boom-achieve-climate-targets-bdew>. Acesso em: 7 set. 2021.

MOSHKSAR, E.; GHANBARI, T. A model-based algorithm for maximum power point tracking of PV systems using exact analytical solution of single-diode equivalent model. **Solar Energy**, v. 161, p. 117-131, 2018.

RIVERA, E.; PENG, F. Z. Algorithms to Estimate the Temperature and Effective Irradiance Level over a Photovoltaic Module using the Fixed Point Theorem. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference, 37, 2006. **Anais Eletrônico**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1711792>. Acesso em: 7 set. 2021.

SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALYVOS, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 92, p. 1393-1402, 2008.

TAN, R. H. G.; TAI, P. L. J.; MOK, V. H. "Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement". **IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)**, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSIMA.2013.6717943.

ZEČEVIĆ, Ž.; ROLEVSKI, M. Neural Network Approach to MPPT Control and Irradiance Estimation. **Appl. Sci**, v. 10, e. 5051, p. 1-17. **2020**. doi:10.3390/app10155051.

## VI. AGRADECIMENTOS

À Cooperação CAPES/FAPES - Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação - PDPG, através do projeto "TIC+TAC: Tecnologia da Informação e Comunicação + Tecnologia de Automação e Controle, As Tecnologias Inteligentes, Prioritárias," pelo apoio financeiro da pesquisa, por meio do Edital FAPES/CNPq N° 23/2018 – PRONEM (Termo de Outorga 133/2021 e Processo N° 2021-CFT5C).

Ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***ANALYSIS OF A WATER PUMPING SYSTEM USING A VERTICAL AXIS WIND TURBINE IN THE BRAZILIAN SCENARIO***

### ***ANÁLISE DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA UTILIZANDO UM AEROMOTOR EÓLICO DE EIXO VERTICAL NO CENÁRIO BRASILEIRO***

Andrei Testi<sup>1</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>2</sup>

***Resumo – Este artigo apresenta uma análise do sistema de bombeamento d'água utilizando um aeromotor de eixo vertical como a fonte de energia motora. Esse equipamento eólico apresenta algumas vantagens comparado ao aeromotor de eixo horizontal, tais como: seu funcionamento não é impactado pela mudança de direção dos ventos, apresentam menor emissão de ruído, construção mecânica mais simples devido ao emprego apenas de peças e componentes mais simples, apresenta um auto acionamento a partir de baixos ventos, as tarefas de manutenção são extremamente mais fáceis de serem executadas em campo, seu custo de aquisição é menor, não necessitam de controle eletroeletrônico para ajuste de pás. A sua principal desvantagem é possuir um Cp menor. Considerando as suas vantagens e desvantagens, o aeromotor de eixo vertical é tema de estudos acadêmicos de viabilidade tecno-econômica em diversas frentes da engenharia.***

***Palavras-chave: VAWT. Baixos Ventos. Bombeamento.***

***Abstract - This article presents an analysis of the water pumping system using a vertical axis wind turbine as a mechanical energy source. The vertical axis wind turbine has some advantages when compared to the horizontal axis wind turbine, such as: its operation is not impacted by the change in the direction of the winds, it has lower noise emission, simpler mechanical construction due to the use of less complex parts and components, it features self-activation from low winds, its maintenance tasks are extremely easier to perform in the field, its acquisition cost is lower, no electronic control for blade adjustment is necessary. Its main disadvantage is having a slightly lower Cp. Recognizing their advantages and disadvantages, vertical axis wind turbines are subject of academic studies of techno-economic feasibility from several engineering topics.***

***Keywords: VAWT. Low Winds. Pumping.***

---

1 Universidade do Estado de São Paulo – Unesp. Campus Guaratinguetá. Contato: andrei.testi@unesp.br;

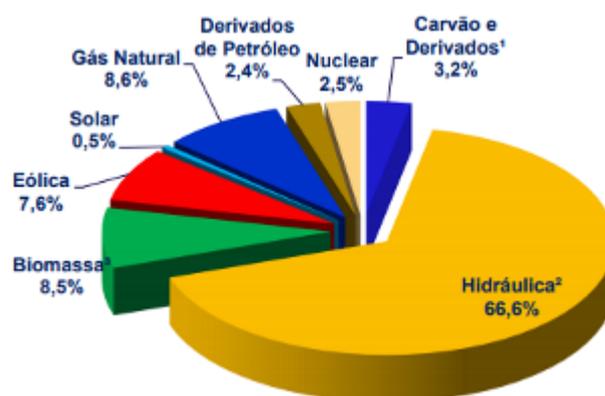
2 Universidade do Estado de São Paulo – Unesp. Campus Guaratinguetá. Contato: teofilo.souza@unesp.br.

## I. INTRODUÇÃO

As empresas e a comunidade científica de todo o mundo têm estudado as fontes alternativas de energias devido aos tratados internacionais para a diminuição do nível de emissão de carbono na atmosfera do planeta (KILKIS, 2021). Essa situação leva as empresas e universidades a estudarem formas de aprimoramento, ou até mesmo novas frentes de pesquisa e desenvolvimento, de projetos para fontes alternativas de energias (LUND, 2014).

Segundo Ben (2019), a matriz energética do Brasil possui uma composição variada, na qual a energia eólica se encontra em constante ascensão nesses últimos anos. As Figuras 1 e 2, respectivamente, mostram a composição da matriz energética brasileira, e seu crescimento no âmbito da geração de energia eólica. A Figura 1 mostra que o Brasil apresenta uma matriz energética para a geração de energia elétrica predominantemente advinda de fontes hidráulicas atingindo 66,6%. A energia eólica corresponde à 7,8%. A Figura 2 mostra o constante crescimento da geração de energia eólica no Brasil, com um salto de 663 GWh para 48475 GWh entre 2007 e 2018.

Figura 1 – Matriz elétrica no Brasil 2019.

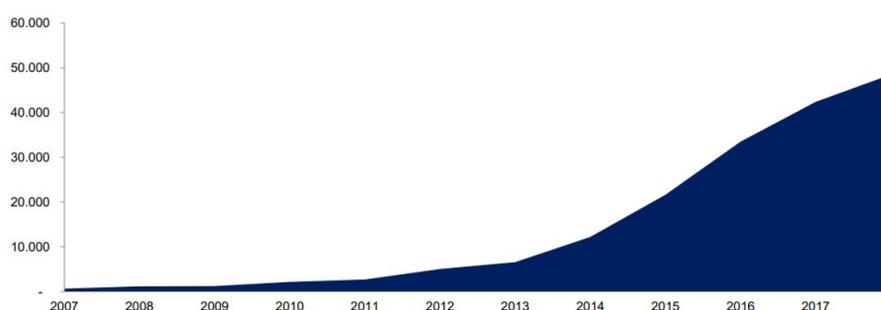


Fonte: Ben, 2019.

Figura 2 – Evolução da geração de energia eólica no Brasil.

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Δ 18/17
663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	21.625	33.489	42.373	48.475	14,40%

em GWh

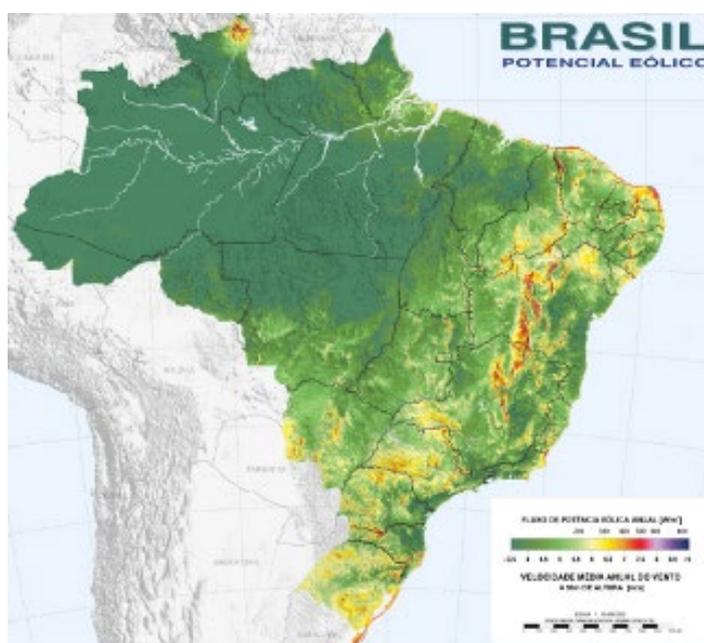


Fonte: Ben, 2019.

O potencial de crescimento da energia eólica no Brasil, apresentados nos gráficos das Figuras 1 e 2, também corroboram com o crescente movimento de pesquisas e desenvolvimento realizados pelo restante do mundo (AHMAD et al, 2021; W. U. REHMAN et al, 2020; MENGAL et al, 2014).

De acordo com o mapa brasileiro de ventos, apresentado na Figura 3, nota-se uma predominância de ventos entre 3,5 e 5,5 m/s (ANEEL, 2019). Porém, essa análise das velocidades e regime de ventos citadas, advém da coleta dados de aeroportos e estações meteorológicas espalhadas no país. Isso significa dizer que a avaliação do potencial eólico de uma determinada região demanda estudos sistemáticos de coleta e análise de dados do local desejado (ATLAS, 2012; MAGALHÃES e GONÇALVES, 2020).

Figura 3 – Mapa dos ventos no Brasil.



Fonte: Aneel, 2019.

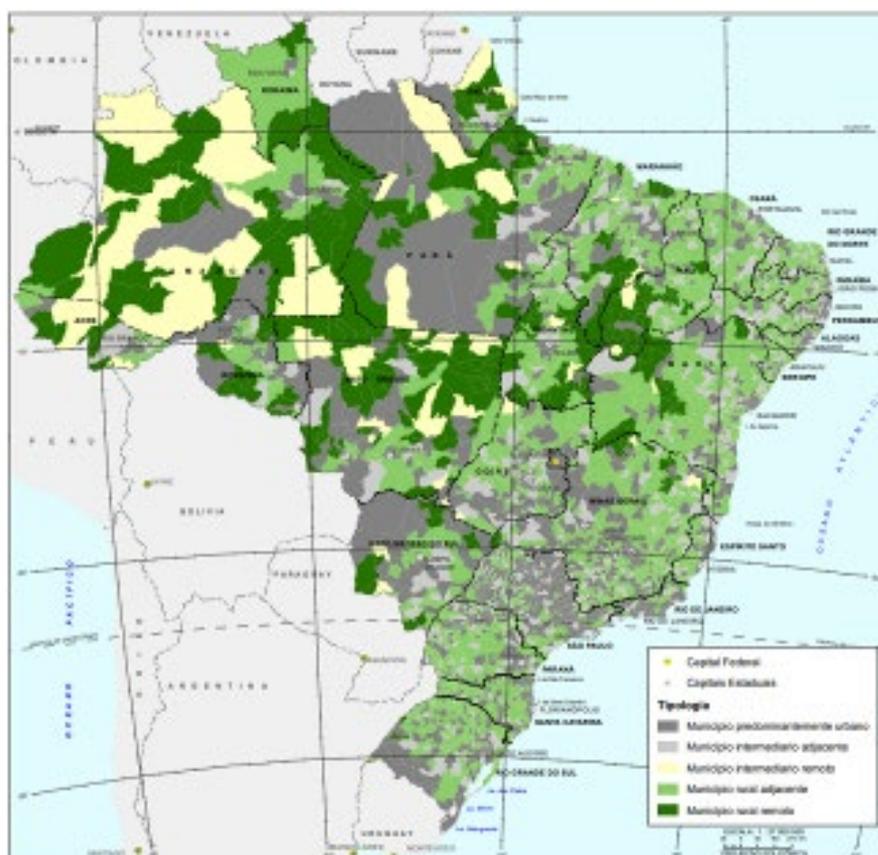
Em complemento ao parágrafo anterior, Aneel (2008) afirma que:

“O Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que dá maior previsibilidade ao volume a ser produzido. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (ANEEL, p.81, 2008),”

A Figura 4 também mostra uma tipologia característica sobre o território brasileiro, na qual 76% de sua população habita somente 26% dos municípios do país.

Na tipologia proposta neste estudo, nota-se que 76,0% da população brasileira se encontra em municípios considerados predominantemente urbanos, correspondendo somente a 26,0% do total de municípios. A maior parte dos municípios brasileiros, foram classificados como predominantemente rurais (60,4%), sendo 54,6% como rurais adjacentes e 5,8% como rurais remotos (IBGE, 2017).

Figura 4 – Tipologia rural e urbana no Brasil



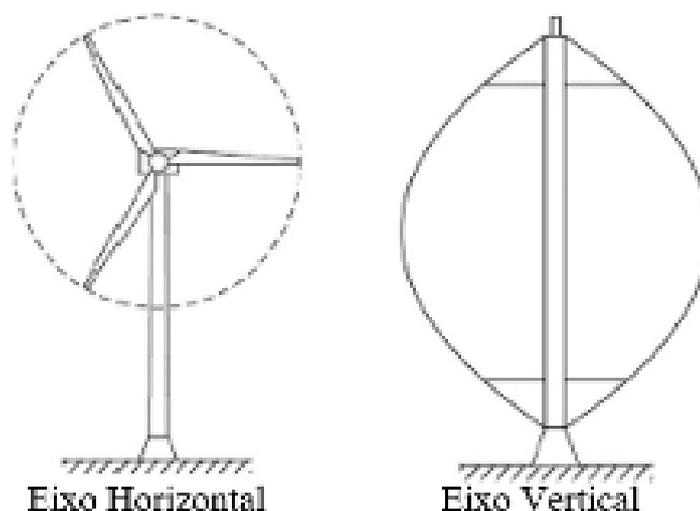
Fonte: IBGE, 2017.

Considerando o contexto de fontes alternativas e renováveis de energias, que têm sido tópicos de constantes pesquisas e desenvolvimentos, tanto nas universidades como nas empresas, tem-se o aeromotor de eixo vertical que apresenta simplicidade construtiva, versatilidade operacional com um bom desempenho mediante condições a partir de baixos ventos e menores custos de aquisição, operação e manutenção (AHMAD et al, 2021) (W. U. REHMAN et al, 2020) (MENGAL et al, 2014). Os estudos relacionados às diversas frentes que compõem um sistema eólico de eixo vertical, tais como: melhor perfil padronizado para a construção das pás, solidicidade, velocidade de ponta de pá, quantidade de pás, formato da pás, ângulo de fixação da pá, carga nos rolamentos, influência do arrasto produzido no bordo de fuga das pás no  $C_p$  e torque de eixo, entre outros, demonstram um potencial significativo de ascensão para adquirirem uma maturidade comercial semelhante aos aeromotores de eixo horizontal (ALBUQUERQUE e MATOS,

2016; Balduzzi, 2016; PIERRE-LUC *et al*, 2016; Delafin *et al*, 2016; Hashem e MOHAMED, 2018).

A Figura 5, mostra os dois tipos de aeromotores, o de eixo horizontal e de eixo vertical. O aeromotor de eixo horizontal, tem seu eixo paralelo ao fluxo de ar que corta as pás eólicas. Já o aeromotor de eixo vertical possui o seu eixo cortando o fluxo de ar, alinhado com as pás eólicas (Fadil, 2017; Mohammed, 2019).

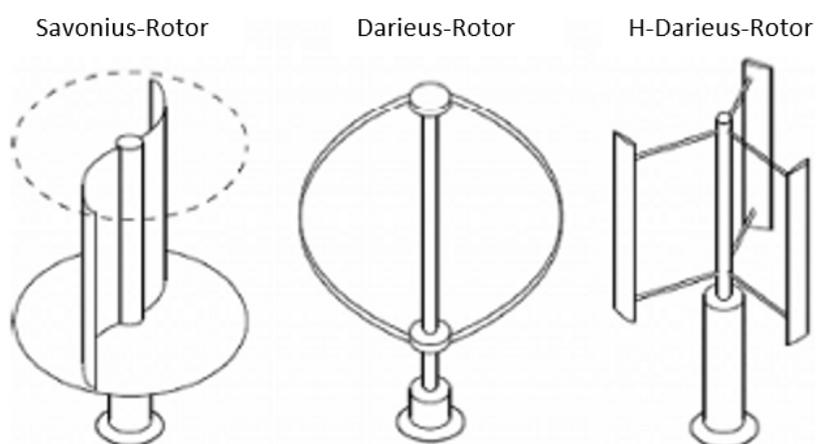
Figura 5 – Tipos de aeromotores.



Fonte: Adaptado de Mohammed, 2019.

A Figura 6, mostra os tipos mais comuns de aeromotores de eixo vertical. O tipo Savonius tem características aerodinâmicas de arrasto, com um maior torque e menor eficiência aerodinâmica  $C_p$ . O tipo Darrieus tem características aerodinâmicas de sustentação e conseqüentemente apresenta um menor torque e uma maior eficiência aerodinâmica  $C_p$  (MOHAMMED, 2019).

Figura 6 – Tipos de aeromotores de eixo vertical.



Fonte: Mohammed, 2019.

Segundo Paraschivoiu (2002), Fadil, Soediby e Ashari (2017); Gumilar *et al* (2019), as diferenças mais marcantes entre o aeromotor de eixo vertical (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*) e de eixo horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) são:

- Funciona com ventos de quaisquer direções e não requer sistema eletroeletrônico para ajuste das pás;
- Auto acionamento a partir de baixos ventos;
- Conversão e transmissão de energia mais simples;
- Instalação de geradores e bombas para fluidos ao nível do solo, o que facilita significativamente à manutenção;
- Mais utilizados em soluções de pequenas e médias potências; Agrupado em instalações com menores distâncias entre si, em caso de parques eólicos;
- Menor ruído;
- Menor eficiência aerodinâmica  $C_p$  (HAWT teórico é 0,592 e o VAWT teórico é 0,554);
- Menor abrangência comercial.

A maior eficiência aerodinâmica,  $C_p$ , do aeromotor de eixo horizontal, citada acima, fez com esses equipamentos se aprimorassem significativamente na correção dos problemas de operação, transformando-os em soluções viáveis, ocupando definitivamente praticamente todo o espaço comercial de sistemas eólicos. No entanto, constata-se também que o aeromotor de eixo vertical ainda é tópico de pesquisas em diversas revistas acadêmicas, na busca pelo aprimoramento de sua eficiência aerodinâmica  $C_p$ , analisando em detalhes os tipos e número de pás, TSR (*Tip Speed Ratio*) solidicidade, diâmetro do rotor vs. altura de pás entre outros (FADIL, SOEDIBYO e ASHARI (2017); GUMILAR *et al*, 2019; EMEJEAMARA e TOMLIN, 2020).

A descrição do parágrafo anterior também é corroborada pela atuação da empresa Seatwirl® em estudos, desenvolvimentos e instalações de aeromotores de eixo vertical *off-shore* (grande porte) e *on-shore* (pequeno e médio portes).

De acordo com Geroto (2012), Gumilar *et al*, (2019) e Rossato (2019), a potência de saída de uma turbina eólica tipo Darrieus “H” é obtida em função da velocidade do vento que incide nas pás aerodinâmicas, densidade do ar, diâmetro do rotor e do coeficiente de potência, demonstrada na Eq.1.

$$P_{eólica} = (1/2) \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot C_p \cdot \eta \quad (1)$$

Tem-se que:

$P_{eólica}$  = Potência eólica do aeromotor [W]

$\rho$  = densidade do ar nível do mar = 1,225 kg/m<sup>3</sup>;

$v$  = velocidade média do vento [m/s];

$r$  = raio do rotor da turbina [m];

$\eta$  = rendimento global da máquina eólica [adm];

$C_p$  = coeficiente de potência [adm].

O coeficiente de potência  $C_p$  é a eficiência aerodinâmica de um aeromotor eólico, na qual o seu máximo valor teórico, que é possível de extrair de tanto de uma turbina eólica de eixo horizontal como uma de eixo vertical, é respectivamente de 0,593 e 0,544. No entanto, considerando os tipos de turbinas eólicas existentes, nota-se que há outros fatores que causam uma redução ainda maior de  $C_p$ , tais como as perdas adicionais inerentes aos fatores construtivos de cada aeromotor (ROSSATO, 2019). Dessa forma, segundo Rossato (2019), o  $C_p$  de um aeromotor de eixo vertical tipo Darrieus-H não passa de 0,3. Assim a Eq.1 transforma-se na Equação 2:

$$P_{eólica} = 0.18 D.h. v^3 \quad (2)$$

Tem-se que:

$P_{eólica}$  = Potência eólica do aeromotor [W]

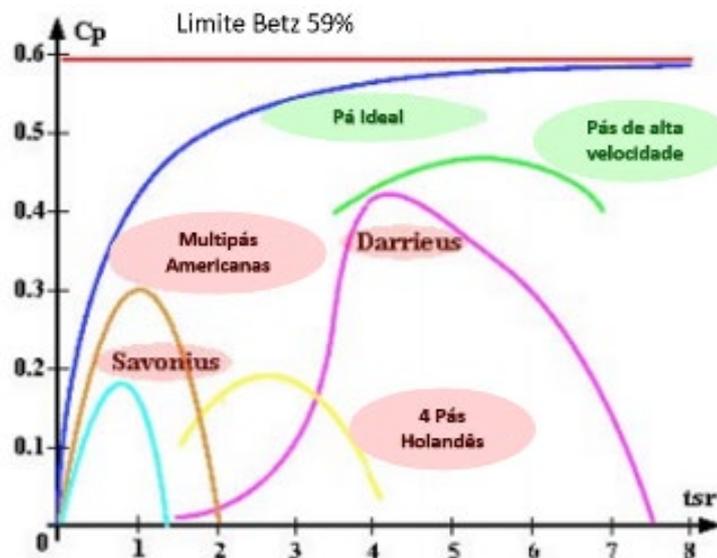
D = Diâmetro do rotor [m];

h = Altura do rotor [m];

v = velocidade média do vento em m/s.

O gráfico da Figura 7, ilustra os tipos mais comuns de aeromotores eólicos e seus respectivos valores de  $C_p$ , que também corroboram com a simplificação da Eq.1 transformando-a na Eq.2 (GEROTO, 2012; HASHEM e MOHAMED, 2018; DIDANE, 2019; GUMILAR *et al*, 2019). A Figura 7, mostra a diferença entre os coeficientes aerodinâmicos  $C_p$ , para cada tipo de aeromotor, em função do fator adimensional de velocidade de ponta de pá (TSR – *Tip Speed Ratio*).

Figura 7 – Valores de  $C_p$  em função do TSR para diversos tipos de aeromotores eólicos.



Fonte: Geroto, 2012.

A Figura 7, mostra que a variação do  $C_p$  de cada aeromotor eólico advém da diferença dimensional ou construtiva de cada equipamento, que está representada pelo termo adimensional da velocidade de ponta de pá, mais conhecido como TSR (*Tip Speed Ratio*), definido pela Eq.3 (GEROTO, 2012; HASHEM e MOHAMED, 2018; GUMILAR *et al*, 2019).

$$\lambda = \omega \cdot R/v \quad (3)$$

Tem-se que:

$\lambda$  = velocidade de ponta de pá [adm];

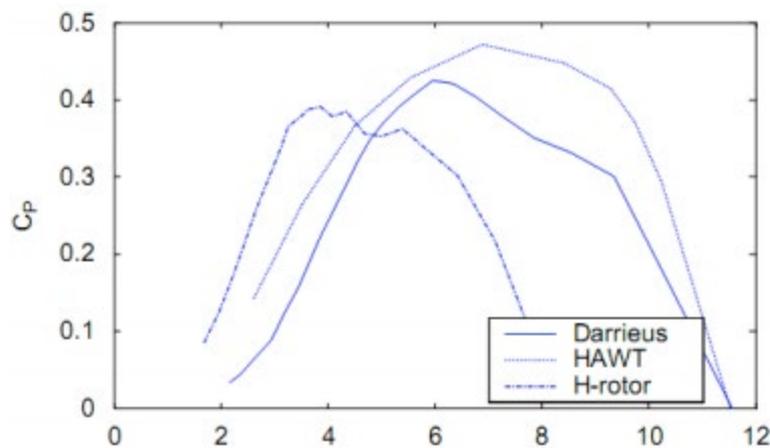
$\omega$  = velocidade angular do aeromotor [rad/s];

R = raio do rotor [m];

v = velocidade do vento [m/s].

O gráfico da figura 8, apresenta três curvas de  $C_p$  em função do fator  $TSR$  para os aeromotores eólico tipo Darrieus, H-Rotor e Eixo Horizontal (HAWT). Nota-se que o  $C_p$  também é afetado pelo fator  $TSR$  (GEROTO, 2012; HASHEM e MOHAMED, 2018; GUMILAR *et al*, 2019).

Figura 8 – Curvas de  $C_p$  em função do TSR.



Fonte: Geroto, 2012.

De acordo com Geroto, (2012); Hashem e Mohamed, (2018); Gumilar *et al*, (2019), a solidicidade é mais um fator importante no projeto de aeromotores eólicos porque determina a relação entre o número de pás do rotor, a corda da pá e o raio do rotor da turbina. A Eq.4 demonstra como é obtida a solidicidade para os aeromotores de eixo vertical:

$$\sigma = B \cdot c / R \quad (4)$$

Tem-se:

$\sigma$  = solidicidade [adm];  
B = número de pás [adm];  
c = corda da pá [m];  
R = raio do rotor [m].

Segundo Gumilar *et al*, (2019), quanto maior a solidicidade menor é a velocidade de ponta de pá, no entanto, maior é a esteira aerodinâmica no bordo de fuga de cada pá, que pode afetar a sustentação da respectiva pá.

Segundo Rossato (2019), aeromotores com alta solidicidade apresentam um alto torque com uma baixa velocidade de rotação, cuja tal característica é muito útil para bombeamento d'água utilizando as bombas de deslocamento positivo.

O coeficiente de torque  $C_m$ , determina a eficiência aerodinâmica da máquina eólica em termos de torque gerado no eixo. Esse fator é dado em função da velocidade do vento no local, área varrida pelo aeromotor, raio da turbina e torque.

$$C_m = M / 0,5 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R \quad (5)$$

Tem-se que:

$C_m$  = coeficiente de torque [adm];  
M = torque no eixo do aeromotor [N.m];  
u = velocidade média do vento [m/s];  
A = área varrida [m<sup>2</sup>];  
R = raio da turbina [m].

A Eq.5 descreve a área varrida de um aeromotor de eixo vertical. A Eq. 6 é uma outra forma de demonstrar o coeficiente de torque em função do  $TSR$  e do  $C_p$ .

$$A = 2/3 \pi R^2 \quad (6)$$

Tem-se que:

R = Raio do rotor [m].

Segundo Rossato, (2019), o bombeamento d'água utilizando energia eólica é uma técnica antiga ainda muito pesquisada e empregada no século XXI DC para o consumo animal, humano e irrigação de plantio. As necessidades citadas no parágrafo acima são comuns e importantes em diversas regiões do mundo. Dessa forma, escolher o tipo de bomba mais adequado para executar uma determinada função é de suma importância. Os equipamentos mais comumente utilizados para essas demandas de transmissão dos sistemas eólicos às bombas d'água são:

- Bomba centrífuga de baixa rotação é utilizada para pequenas alturas manométricas, e apresenta limitações de eficiência para uma faixa estreita de rotação do aeromotor;
- Bomba centrífuga alta rotação geralmente requer rotações que os aeromotores não dispõem, dessa forma, são alimentadas por energia elétrica;
- Bomba de deslocamento positivo, seja rotacional ou recíproca, muito comum em projetos de autoconstrução na qual apresenta boa eficiência em uma faixa mais ampla de velocidades de aeromotores eólicos, tornando-os bem versáteis para situações diferentes.

Segundo Rossato (2019), a potência eólica necessária para realizar o bombeamento d'água depende dos parâmetros descritos na Eq.6. Nota-se que a potência demandada para o bombeamento d'água é bem sensível a vazão volumétrica “ $Q$ ” e altura de recalque “ $H$ ”, ou seja, quanto maiores forem a vazão volumétrica e a coluna d'água a ser transportada maior é a potência necessária. Quanto menor forem as eficiências da bomba e do mecanismo de transmissão, ainda maior é a potência necessária do sistema eólico para realizar o bombeamento.

Já os parâmetros de densidade d'água e aceleração da gravidade são praticamente constantes.

$$P_{eólica} = Q \rho g H / \eta_{bomba} . \eta_{mecanismo} \quad (7)$$

Tem-se que:

$P_{eólica}$  = Potência fornecida à bomba [W];

$Q$  = Vazão volumétrica [ $m^3/s$ ];

$H$  = Altura manométrica de bombeamento (+10% devido à perdas por atrito na parede dos tubos) [m];

$\rho$  = Densidade da água [ $kg/m^3$ ]

$g$  = Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$\eta_{bomba}$  = Rendimento da bomba [adm];

$\eta_{mecanismo}$  = Rendimento do acoplamento [adm];

Tabela 1 mostra valores de referência para alguns tipos de turbinas eólicas, bombas e dispositivos de conversão e transmissão de energia. Observa-se que alguns valores de  $C_p$ 's mostrados nessa tabela também corroboram com o gráfico da Figura 7, que demonstra que os aeromotores de eixo vertical tipo Darrieus tem eficiência superior quando comparado aos aeromotores de eixo vertical tipo Savonius e moinhos de vento (ROSSATO, 2019).

Tabela 1 - Resumo das eficiências de algumas turbinas eólicas, bombas e dispositivos de conversão.

<b>Turbinas</b>	<b><math>C_p</math></b>
Moinho de vento	0,3
Aeromotor Savonius	0,3
HAWT 3 pás	0,42
VAWT Tipo Darrieus 3 pás	0,35
<b>Bombas</b>	<b>Eficiência</b>
Pistão (Edeito simples e duplo)	0,9
Pistão (Fabricação artesanal)	0,85
Diafragma / bexiga / fole macio	0,80
Peristáltica - tubo de borracha extrudado	0,80
Corde e discos	0,80
Centrífuga (abaixo de velocidade)	0,65
Centrífuga (velocidade correta)	0,80
<b>Conversão/Transmissão</b>	<b>Eficiência</b>
Biela manivela	0,98
Polias e correias	0,95

Fonte: Rossato (2019).

## II. METODOLOGIA

Para a elaboração deste artigo utilizou-se a pesquisa bibliográfica com base em estudos e análises de artigos e documentos sobre energias renováveis e fontes alternativas de energias relacionados com aeromotores de eixo vertical e horizontal dentro do contexto brasileiro.

## III. RESULTADOS

Aized *et al*, (2019) realizou um estudo completo sobre o bombeamento d'água utilizando um moinho de vento na região do Paquistão. Seu estudo engloba revisão literária, estudo detalhado dos ventos em várias cidades do Paquistão, determinação das especificações de projeto, métodos analíticos e simulação fluido dinâmica computacional, e geração de dados. Essa pesquisa mostra que o moinho de vento selecionado possui alta solidicidade e baixa velocidade de ponta de pá para obter o torque necessário para a auto partida a partir de baixos ventos (2,5 a 5,0 m/s). Por último, o estudo apresenta um gráfico sobre as parcelas energéticas que cada equipamento consome para converter a energia eólica em bombeamento d'água.

A Tabela 2 mostra o bombeamento d'água utilizando um catavento que possui uma torre de cerca de 10 m de altura, com pás de 3 m e vento de 3,5 m/s, garantindo um bombeamento de água de aproximadamente 945 L/h (6 horas de vento).

Tabela 2 – Valores obtidos durante os testes.

$Q_m$ [m <sup>3</sup> /dia]	$Q_m$ [l/dia]	V eólica [m/s]	H (m)
1,95	1953	2,5	15
3,41	3407	3	
5,68	5678	3,5	
8,06	8063	4	
11,52	11515	4,5	
15,76	15762	5	

Fonte: Aized *et al.*, (2019).

De acordo com Matos *et al.*, (2021), há uma grande demanda pelo uso dos aeromotores eólicos para bombeamento de água dos poços para o consumo humano ou irrigação em zonas rurais áridas do estado do Ceará. O autor menciona que tem um desafio naquela região devido ao fato dessa água vir de poços salinizados, havendo a necessidade de dessalinizar essa água para o uso. Dessa forma, há uma necessidade em extrair água desses poços de forma eficiente, sustentável e economicamente viável. A maneira encontrada pelo autor de viabilizar tecno-economicamente esse trabalho é orientar de acordo com alguns parâmetros tais como a média de ventos acima de 5 m/s associado às curvas de desempenho do sistema. Um ponto importante abordado pelo autor, também confirmado ao analisar as publicações de Aized *et al.*, (2019), Gauto (2012) e Almeida (2016), é a escassez de informações de por parte dos fornecedores de moinhos de vento sobre curvas de desempenho associadas às vazões das bombas, e o procedimento para obtê-las também não é simples. A Tabela 3 apresenta o resultado dos modelos criados pelo autor para calcular a vazão em função dos ventos e do diâmetro do moinho de vento.

Tabela 3 – Valores obtidos durante os testes.

$Q_m$ [m <sup>3</sup> /dia]	$Q_m$ [l/dia]	V eólica [m/s]	Moinho diâmetro (m)
1,7	1700	4,5	3,7
9,1	9100	6,5	6,1

Fonte: Matos *et al.*, (2021)

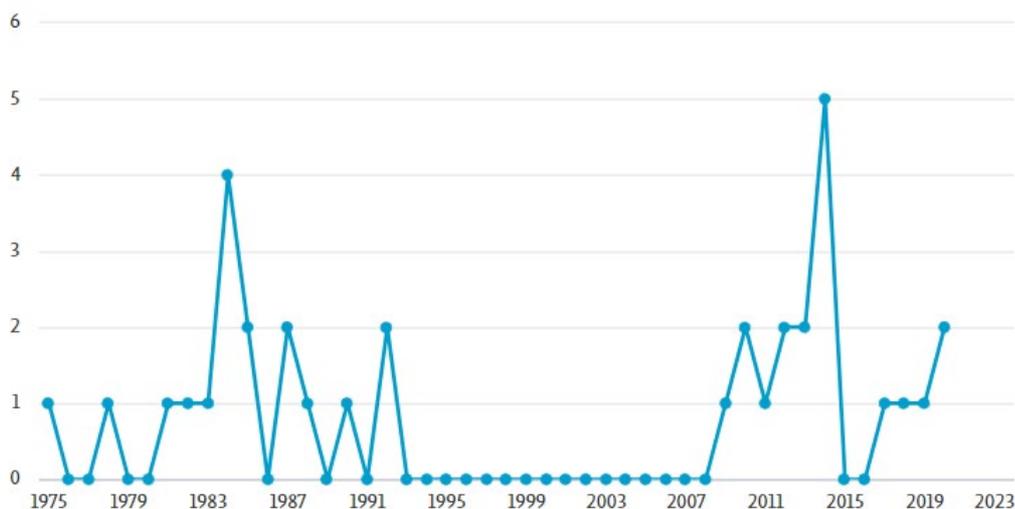
De acordo com Gauto (2012), é viável a utilização de um aeromotor de eixo vertical para bombeamento de água em residências de pequenas comunidades e no meio rural para irrigação, residências e agropecuária em geral. Sua pesquisa demonstrou bons resultados de operação de um sistema de bombeamento d'água acoplado a um aeromotor de eixo vertical com 4 pás eólicas em pequena escala adaptável às áreas com ventos na velocidade de 6,5 m/s.

Almeida (2016), afirma que se publica estudos sobre a implementação de sistemas eólicos em locais remotos, tais como regiões rurais, cujas instalações de distribuição de energia elétrica não chegam às residências devido ao alto custo de instalação e manutenção da rede elétrica nesses locais.

A Figura 9 ilustra a pesquisa bibliográfica na Scopus com as palavras-chave “*Vertical Axis Wind Turbine*” e “*Water Pump*” que identificou uma lista de 23 artigos (eixo das ordenadas) ao longo de todos os anos desde o início da série histórica (eixo das abscissas),

na qual apenas o artigo de Tian *et al*, (2015) está relacionado com o acoplamento de um aeromotor de eixo vertical a uma bomba elétrica tipo parafuso BPZ-18. No entanto, esse artigo é de um periódico de baixa relevância.

Figura 9 – Gráfico de publicações com as palavras-chave “Vertical Axis Wind Turbine” e “Water Pump” na plataforma Scopus



Fonte: Autor (2021).

Os sistemas fotovoltaicos também são utilizados no bombeamento d’água nas regiões sem acesso à água corrente e eletricidade, porém, eles ainda têm custos mais elevados de aquisição e apresentam uma maior complexidade quando comparados aos sistemas puramente mecânicos (Gabriel *et al*, 2016; SREEWIROTE *et al*, 2017). Além disso, atualmente ainda há dependência tecnológica e logística de peças por parte da China e outros países (RABE, KOSTKA e STEGEN, 2017).

Um outro sistema mecânico muito utilizado em propriedades rurais do Brasil é a roda d’água, cujo princípio de bombeamento d’água desse sistema se assemelha muito ao dos sistemas de um aeromotor de eixo vertical, no entanto, o fluido de trabalho é o ar. Esse sistema apresenta uma capacidade de 4000 litros d’água por dia obtido através de uma rotação de eixo da roda d’água por volta de 45 RPM (SOUZA e SOUZA, 2006; ZMBOMBAS, 2020).

#### IV. CONCLUSÃO

A técnica utilizada neste estudo de pesquisa indica que a utilização de um aeromotor de eixo vertical para bombeamento d’água pode ser até mais viável economicamente do que um catavento convencional, devido ao menor número de peças, menor complexidade de montagem, menor custo de manutenção e a não necessidade de dispositivos complexos ou eletroeletrônicos para a mudança de direção de ventos. Esse projeto pode atender regiões rurais que não possuem quedas d’água para a utilização de rodas d’água, e ficam longe de locais onde tem fornecimento de eletricidade. Também, o projeto de um aeromotor de eixo vertical acoplado a uma bomba de deslocamento positivo para bombeamento d’água pode apresentar viabilidade tecno-financeira quando comparado aos sistemas fotovoltaicos

devido a possíveis complicadores oriundos de mercado de acordo com Rabe, Kostka e Stegen (2017). A pesquisa bibliográfica também apontou para uma falta de pesquisas acadêmicas sobre aeromotores de eixo vertical para bombeamento d'água.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, S.; Nawaz, T.; Rahman, H.U.; Saher, S.; Ahmed, M. Prospects of Vertical Axis Wind Turbines for Urban Electrification in Pakistan, 2021 **International Conference on Emerging Power Technologies (ICEPT)**, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEPT51706.2021.9435525.

Aized, T.; Rehman, S.M.S.; Kamran, S.; Kazim, A.H.; Rehman, S.S.U. Design and analysis of wind pump for wind conditions in Pakistan; **Advances in Mechanical Engineering**. 2019, Vol. 11(9) 1–18; DOI: 10.1177/1687814019880405.

Albuquerque, I. M.; Matos, F.F.S. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines. **IEEE Latin America Transactions**, vol. 14, no. 10, pp. 4255-4260, Oct. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7786302.

ANEEL - Agência nacional de energia elétrica. **Potencial Eólico Brasileiro**, 2019, Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_eolica/6\\_3.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_3.htm) >, Acesso em: Outubro de 2020.

ANEEL - Agência nacional de energia elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2008. Disponível em: . Acesso em: 12 ago. 2021.

ATLAS Eólico do Estado de São Paulo. – **São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia**, 2012 titulares dos direitos da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, ISBN 978-85-66444-00-1.

Balduzzi, F; Bianchini, A; Maleci, R; Ferrara, G; Ferrari, L. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. **Renewable Energy**, ELSEVIER, Volume 85, 2016, Pages 419-435, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>.

BEN - Balanço Energético Nacional. “**Empresa de Pesquisa Energética**”, 2019, (Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética).

Didane, D.H; Maksud, S.M; Zulkafli, M.F.; Rosly, N.; Shamsudin, S.S.; Khalid, A. Performance investigation of a small Savonius-Darrius counter-rotating vertical-axis wind turbine, 2019, **International Journal of Energy Research**. Volume 44, Issue 12 p. 9309-9316, <https://doi.org/10.1002/er.4874>.

Emejamara, F.C.; Tomlin, A.S. A method for estimating the potential power available to building mounted wind turbines within turbulent urban air flows. **Renewable Energy**, Volume 153, 2020, Pages 787-800, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.123>.

Fadil, J.; Soediby; Ashari, M. Performance comparison of vertical axis and horizontal axis wind turbines to get optimum power output. In **15th International Conference on Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering**, 2017, pp. 429-433, doi: 10.1109/QIR.2017.8168524.

Gabriel Filho, L. R. A.; Seraphim, O. J.; Caneppele, F. L.; Gabriel, C. P. C.; Putti, F. F. Variable analysis in wind photovoltaic hybrid systems in rural energization, **IEEE Latin America Transactions**. vol. 14, no. 12, pp. 4757-4761, Dec. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7817007.

Gauto, H.F. Wind power, Hydro power, Grid systems, Turbines, Water treatment. University of Alabama in Huntsville, Department of Civil and Environmental Engineering, Huntsville, Alabama 35899 <https://doi.org/10.1061/9780784412312.270> Published online: July 11, 2012 ASCE Subject Headings: Displacement (mechanics), Wind speed, Pumps Conference Information **World Environmental And Water Resources Congress 2012** May 20-24, 2012 | Albuquerque, New Mexico, United States.

Gumilar, L.; Habibi, M.A.; Prihanto, D.; Wicaksono, H.; Gunaman, A.; Larasati, J.R. Maximum Power of Horizontal and Vertical Wind Turbine to Changes on Wind Speed and Number of Blade. **International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)**, 2019, pp. 27-31, doi: 10.1109/ICEEIE47180.2019.8981448.

Hashem, I.; Mohamed, M.H. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. **Energy**, ELSEVIER, Volume 142, 2018, Pages 531-545, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.036>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil : uma primeira aproximação**, ISBN 978-85- 240-4421-2 Coordenação de Geografia. – Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

Kilkis, B. An exergy-based minimum carbon footprint model for optimum equipment oversizing and temperature peaking in low-temperature district heating systems, **Energy**, Volume 236, 2021, 121339, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121339>.

Lund, H. Renewable energy systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions, **Academic Press**, Elsevier, Massachusetts, USA (2014).

Magalhães R.F.D.; Gonçalves D. C.; Panorama da matriz elétrica renovável brasileira. **XLIII International Sodebras Congress**, Volume 15 – Nº 180 – Dezembro / 2020. DOI: <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.15.2020.180.11>.

Matos, F.F. S.; Palombella, F.O.; Dantas, P.H.S.M.; Dias S.V.; Almeida, J.R.F.; Santos, D.M. A methodology to obtain the performance curves of windmills associated with piston pumps: application in water desalination systems by reverse osmosis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 43, 322 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03045-x>.

Mengal, A.; Uqaili, M.A; Harijan, K.; Memon, A.G. Competitiveness of Wind Power with the Conventional Thermal Power Plants Using Oil and Natural Gas as Fuel in Pakistan, **Energy Procedia**, Volume 52, 2014, Pages 59-67, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.054>.

Mohammed, A. A.; Ouakad, H. M.; Sahin, A. Z.; Bahaidarah, H. M. S. Vertical Axis Wind Turbine Aerodynamics: Summary and Review of Momentum, Models. **J. Energy Resour. Technol.** May 2019, 141(5): 050801. DOI link: <https://doi.org/10.1115/1.4042643>.

Paraschivoiu, I. **Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept**. 2002, École Polytechnique de Montréal, ISBN 2-533-00931-3.

Pierre-Luc, D; Takafumi, N; Lin, W; Athanasios, K. Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine. **Journal of Physics: Conference Series**, 2016. 753. 022033. 10.1088/1742-6596/753/2/022033.

Rabe, W.; Kostka, G.; Stegen, K.S. China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries. **Energy Policy**, ELSEVIER, Volume 101, 2017, Pages 692-699, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.019>.

Rehman, W. U.; Bhatti, A.R.; Awan, A.B.; Sajjad, M.I.A. The Penetration of Renewable and Sustainable Energy in Asia: A State-of-the-Art Review on Net-Metering. in **IEEE Access**, vol. 8, pp. 170364-170388, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022738.

Rossato, M.A. **Small Wind Turbines for Electricity and Irrigation Design and Construction**. 2019. Taylor & Francis Group, LLC, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742.

Sreewirote, B.; Noppakant, A.; Pothisam, C. Performance and economic analysis of solar water pump system. In **2nd International Conference Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE)**, 2017, pp. 73-77, doi: 10.1109/ICSREE.2017.7951514.

Yang-yang, TIAN; Zheng, M.; Hang, GAO; Hai-peng, TENG; Jun, Hu; Yuhan, Zhao; ijun, YU. Power matching of resistance difference typed VAWT in water pumping. **Chemical Engineering** (China). 2015, 43. 22-24. 10.3969/j.issn.1005- 9954.2015.03.006.

ZMBOMBAS, **Fabricante brasileira que atua no mercado de lavadoras de média e alta pressão, bombas solares, bombas de Roda d'água e turbinas hidráulicas**, Disponível em: <https://zmbombas.com.br/produtos> , Acesso em: Outubro de 2020.

## VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.

***ECONOMIC ANALYSIS OF AN EV SOLAR CHARGING  
SYSTEM BASED ON ENERGY CONSUMPTION ESTIMATES  
FOR VEHICLES USED ON PEOPLE TRANSPORTATION***

***ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA SOLAR DE  
CARREGAMENTO VEICULAR BASEADA NA ESTIMATIVA DO  
CONSUMO ENERGÉTICO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS  
UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE PESSOAS***

André Luiz Zamponi Ribeiro<sup>1</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>2</sup>  
Pedro Magalhães Sobrinho<sup>3</sup>

***Resumo – A presente análise tem como objetivo avaliar, sob o ponto de vista econômico, o custo do investimento em um sistema solar para carregamento de baterias em relação ao custo do abastecimento de um veículo que utiliza um motor de combustão interna, levando-se em conta o preço médio da gasolina, diesel e álcool para veículos destinados a transporte de passageiros. Essa análise tem um caráter geral e servirá de base para estudos futuros mais aprofundados.***

***Palavras-chave: Veículos elétricos, carregadores veiculares, análise econômica, transporte de passageiros.***

***Abstract – The goal of the present analysis is to evaluate the cost of the investment on an EV solar charging system compared to the use of regular liquid fossil fuels vehicle, taking in account the average price of gasoline, diesel, and ethanol for people transportation vehicles. This analysis has a generic approach, and it can be the base for deeper studies in the future.***

***Keywords: Electrical Vehicles, EV charger, economic analysis, people transportation.***

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. Campus Guaratinguetá. Contato: alz.ribeiro@unesp.br;

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. Campus Guaratinguetá. Contato: teofilo.souza@unesp.br.

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. Campus Guaratinguetá. Contato: magalhaes.sobrinho@unesp.br.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas houve um grande investimento no desenvolvimento de veículos elétricos como parte de uma estratégia sustentável para a redução da emissão de carbono, e a produção desses veículos está gradativamente crescendo no mundo, ao passo que as vendas aumentam. Países como a Alemanha possuem metas ambiciosas para a substituição da frota de veículos a combustão por elétricos até 2030. Segundo Lee, Pang e Low (2020) em 2030 é esperado que se atinja no mundo o número de 120 milhões de veículos elétricos, que consumirão 271 bilhões de kWh.

No entanto, na atualidade, a frota de veículos elétricos ainda é reduzida em comparação à frota que utiliza motores a combustão, principalmente em relação aos veículos 100% elétricos. Isso pode ser explicado pelo fato de o preço desses veículos ainda ser elevado (Falkoni, Pfeifer, Krajačić, 2020), mas também há restrições devido à autonomia desses veículos, que está aumentando à medida que a tecnologia das baterias e sistemas de gerenciamento de energia evoluem. Outros fatores que estão relacionados diretamente à autonomia, são a disponibilidade de pontos de carga e a velocidade do carregamento do veículo (Falkoni, Pfeifer, Krajačić, 2020). Um veículo que possui autonomia de 300 km viajando da cidade do Rio de Janeiro para São Paulo teria que fazer pelo menos uma parada, já que a distância entre as duas cidades é em torno de 440 km.

Nesse caso, a infraestrutura para o carregamento deve prever pelo menos um posto de reabastecimento entre as cidades, e esse racional deve ser expandido para todo o território brasileiro. Em relação ao tempo de carga, considerando que essa viagem leva em média seis horas, e que se o proprietário do veículo precisar esperar mais duas horas para carregar seu veículo durante a viagem, significaria 1/3 a mais do tempo total, o que fatalmente faria com que esse proprietário, levando isso em consideração, desistisse de migrar para um veículo 100% elétrico. Consequentemente, o perfil de uso do veículo tem uma grande influência na decisão, que será mais ou menos favorável dependendo da infraestrutura da região.

Como resultado do aumento da frota eletrificada e da demanda de energia elétrica, o sistema elétrico precisará comportar esse consumo extra. Com isso, a ampliação da oferta de pontos de recarga é decisiva para a popularização desses veículos (WU et al, 2020), o que implica também no aumento do investimento na infraestrutura, principalmente no que diz respeito ao sistema elétrico.

Parte de uma estratégia de ampliação dessa infraestrutura passa pelas energias renováveis, sobretudo a solar. Shariff et al. (2020) afirmam que a melhor opção factível para tal ampliação é a instalação de sistemas de carregamento solares distribuídos globalmente. Portanto, ela pode ter um papel importante nessa ampliação, pois além da contribuição no alívio do sistema elétrico, contribui também com as metas de sustentabilidade que são buscadas com cada vez mais ênfase.

O objetivo desse estudo é fazer uma análise econômica dos custos em termos energéticos associados ao carregamento de veículos elétricos utilizados em transporte de passageiros por meio de carregadores solares, de forma a compará-los com os custos energéticos atuais de veículos a combustão para assim verificar a sua viabilidade econômica e identificar as oportunidades de redução dos custos para esses sistemas.

## II. METODOLOGIA

A análise que será feita terá como o foco o custo da energia, no caso dos combustíveis líquidos, e do preço do kWh combinado com o investimento em um sistema de geração fotovoltaica. Custos de aquisição dos veículos e manutenção dos mesmos não serão considerados nessa análise, pois como são muito elevados, ainda não se justificam economicamente quando comparados com os da combustão.

Para a realização dessa avaliação foram considerados os seguintes pontos:

- Tipo de transporte;
- Tipo de combustível;
- Preço médio dos combustíveis;
- Percurso médio dos veículos;
- Custo médio do kWh;
- Custo de instalação de um sistema de geração fotovoltaico.

Os dados utilizados nesse estudo foram dados médios em nível nacional, ou seja, as particularidades de regiões, estados e municípios não serão aqui discutidas e podem apresentar resultados distintos dos que aqui serão apresentados. A escolha dessa abordagem se deve à intenção de que esse estudo seja um ponto de partida para futuros estudos mais específicos. No caso dos equipamentos utilizados para o carregamento dos veículos, foram considerados carregadores AC, que são encontrados mais facilmente para uso residencial e comercial, portanto no custo do sistema de geração fotovoltaico está considerado a instalação de um inversor.

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em plataformas como Science Direct, Scopus, IEEE Xplore e Google Academic a partir de 2018. Os dados das informações sobre o preço dos combustíveis e mobilidade urbana foram extraídos de relatórios técnicos de ANP (2021) e ANTP (2018) respectivamente, e em relação ao custo do kWh e sistema de geração fotovoltaica do site da ANEEL (2021) respectivamente, e de fornecedores desses sistemas.

Uma vez reunidas as informações, foram definidos os tipos de veículos para o estudo, no caso ônibus e carros, por representarem a maior parcela de utilização cotidiana e por já existirem versões eletrificadas em maior número (se comparados às motocicletas, por exemplo) circulando nas cidades. As distâncias médias diárias percorridas por eles foram definidas, bem como o consumo energético médio por dia, por pessoa.

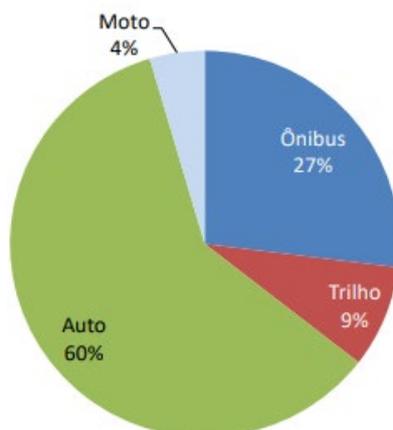
Feito isso, identificou-se o custo atual da energia elétrica no país e o custo de um sistema de geração fotovoltaica que comporte o carregamento de tais veículos, e de posse desses valores, uma comparação desses custos foi feita para se determinar a viabilidade econômica da substituição da frota.

É importante pontuar que nessa avaliação somente foi levado em conta o aspecto energético e econômico, portanto a discussão dos ganhos ambientais e para o sistema elétrico não foram levados em conta nesse momento, podendo ser tópico de avaliação em um trabalho futuro.

### III. LEVANTAMENTO DE DADOS

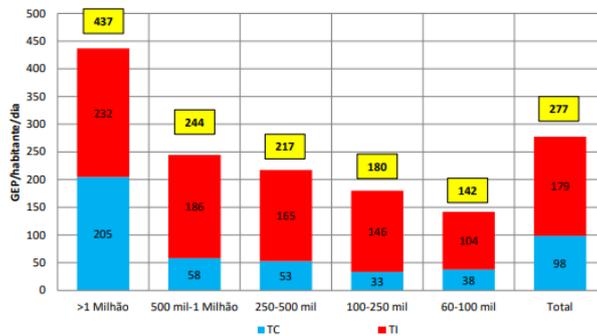
Foram considerados carros e ônibus como os veículos para transporte de pessoas, e para a determinação do deslocamento médio tomou-se como referência os dados extraídos de ANTP (2018), representados nas Figuras 1, 2 e 3.

Figura 1 - Consumo de energia por pessoa por modo de transporte.



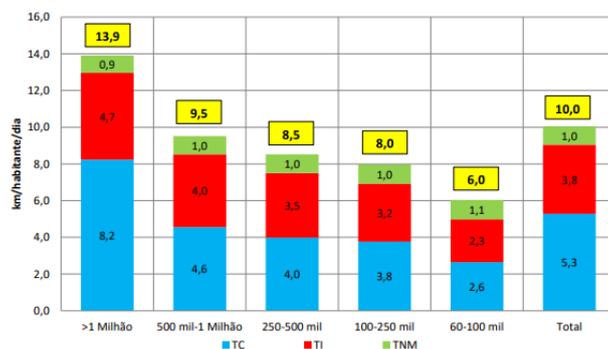
Fonte: ANTP (2018).

Figura 2 - Energia diária gasta por habitante por modo de transporte.



Fonte: ANTP (2018).

Figura 3 - Distâncias diárias percorridas pelas pessoas por habitante.



Fonte: ANTP (2018).

Em relação aos custos dos combustíveis temos como referência a Tabela 1, extraída do relatório da ANP (2021), que fornece o preço médio dos combustíveis no país do dia 18/07/2021 até 14/08/2021. Foram selecionados aqui os combustíveis mais baratos, ou seja, a gasolina aditivada e o diesel S10 não foram considerados.

Tabela 1 - Preço médio dos combustíveis.

Produto	Semana	Preço ao consumidor (R\$)		
		Preço médio	Preço mínimo	Preço máximo
Gasolina comum	18/07/2021	5,833	4,970	6,990
Gasolina comum	25/07/2021	5,822	4,798	6,999
Gasolina comum	01/08/2021	5,853	4,599	7,080
Gasolina comum	08/08/2021	5,866	4,999	7,189
Óleo diesel	18/07/2021	4,597	3,999	6,180
Óleo diesel	25/07/2021	4,588	4,059	6,180
Óleo diesel	01/08/2021	4,598	4,009	6,180
Óleo diesel	08/08/2021	4,600	4,009	6,180
Etanol hidratado	18/07/2021	4,344	3,189	6,890
Etanol hidratado	25/07/2021	4,326	3,649	6,999
Etanol hidratado	01/08/2021	4,339	3,689	6,797
Etanol hidratado	08/08/2021	4,399	3,659	6,899

Fonte: ANP (2021)

Fazendo novamente a média dessas quatro semanas para cada combustível, temos para:

- Gasolina comum: R\$ 5,8435
- Óleo diesel: R\$ 4,5956
- Etanol hidratado: R\$ 4,3520

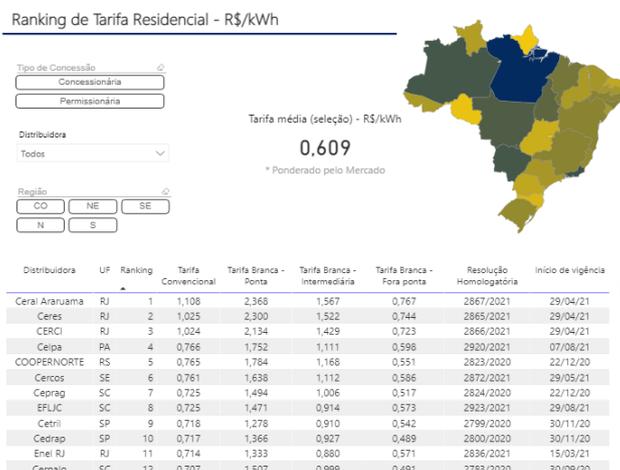
Posteriormente foi determinado o preço médio da tarifa de energia cobrada no Brasil. Desde 2015 foi instituído o sistema de bandeiras para a cobrança da energia elétrica, com isso temos quatro diferentes bandeiras: a verde que não possui cobrança adicional, a amarela, a vermelha patamar 1 e a vermelha patamar 2, que possuem cobranças adicionais, tendo a última o maior valor cobrado. O valor médio cobrado sem tarifas adicionais é de R\$ 0,609 por kWh, dado apresentado na Figura 4, extraída de ANEEL (2021).

Já para as bandeiras amarelas e vermelhas os adicionais em relação ao preço da bandeira verde são:

- Amarela: R\$ 1,874 / 100 kWh
- Vermelha patamar 1: R\$ 3,971 / 100 kWh
- Vermelha patamar 2: R\$ 9,492 / 100 kWh

Para estabelecer um preço médio levando-se em conta as bandeiras tarifárias foi considerado o período em que cada uma entrou em vigência, período esse extraído de ANEEL (2021) e apresentado resumidamente na Tabela 2.

Figura 4 - Preço médio da energia elétrica no Brasil



Fonte: ANEEL (2021).

Tabela 2 - Quantidade de bandeiras tarifárias aplicadas desde 2015

Bandeira	Meses em que foram aplicadas (2015 a 2021)
Bandeira Verde	31
Bandeira Amarela	16
Bandeira Vermelha - Patamar 1	19
Bandeira Vermelha - Patamar 2	9

Fonte: Modificado de ANEEL (2021)

Em 2015 existia somente a bandeira vermelha, que será contabilizada como vermelha patamar 1 para os cálculos propostos. O que se pretende com essa tabela é utilizar a série histórica para estabelecer um padrão de aplicação de cada bandeira que possa ser considerado para projeções futuras.

#### IV. RESULTADOS

Com base nos dados reunidos no capítulo anterior e considerando:

$$1 \text{ TEP (Tonelada Equivalente de Petróleo)} = 11.630 \text{ kWh}$$

Portanto:

$$1 \text{ GEP (Grama Equivalente de Petróleo)} = 11.630 \times 10^{-6} = 0,01163 \text{ kWh}$$

O consumo médio nacional de energia em 2018 por dia por habitante é 179 GEP para transporte individual, isto é, carros e motos. Observando a Figura 1, onde os automóveis representam 60% do meio de transporte utilizado pelas pessoas e as motocicletas representam 4%, conclui-se que, da totalidade dos transportes individuais, o carro representa 94% dessa energia. Com base nessas informações, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Total de energia por dia por habitante (carro)} &= \\ &= 0,011630 \times (0,94 \times 179) = 1,96 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Isso significa que, em média, cada habitante consome 2,1 kWh por dia com transporte individual.

O mesmo princípio foi aplicado para transporte coletivo, isto é, o ônibus. A Figura 1 mostra que o ônibus representa 27% do meio de transporte utilizado pelas pessoas e o transporte sob trilhos, 9%. Isso quer dizer que, da totalidade dos transportes coletivos, o ônibus representa 75% dessa energia e o restante se refere aos trens. Portanto, com base na informação da Figura 2 sobre o consumo energético médio nacional de 98 GEP, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Total de energia por dia por habitante (ônibus)} &= \\ &= 0,011630 \times (0,75 \times 98) = 0,8548 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Já em relação ao custo médio da energia elétrica, toma-se o valor médio atual somado a uma média de cada bandeira com base na frequência em que cada bandeira foi aplicada desde 2015, e que foi apresentada na Tabela 1, obtendo-se:

- Bandeira branca:  $0,609 \times 31 = 18,879$
- Bandeira Amarela:  $(0,609 + 0,01874) \times 16 = 10,043$
- Bandeira Vermelha 1:  $(0,609 + 0,03971) \times 19 = 12,325$
- Bandeira Vermelha 2:  $(0,609 + 0,09492) \times 9 = 6,335$

$$\text{Preço da energia} = (18,879 + 10,043 + 12,325 + 6,335) / 75$$

$$\text{Preço da energia} = 0,6345 \text{ R\$/kWh}$$

Multiplicando esse valor por 1,96 kWh e 0,8548 kWh tem-se:

$$\text{Valor gasto por dia por pessoa (carro)} = \text{R\$ } 1,2436$$

e

$$\text{Valor gasto por dia por pessoa (ônibus)} = \text{R\$ } 0,5424$$

Agora, considerou-se a distância média nacional percorrida por uma pessoa que se utiliza de transporte individual e ônibus (ver Figura 3) e o valor gasto em relação ao

combustível para percorrer essa distância. Complementado o estudo, considera-se uma estimativa aceitável de um consumo médio de 9,46 km/litro para carros obtido pela média de consumo na cidade de todos os veículos avaliados em INMETRO (2021) e 0,37 litros/km o que significa 2,7 km/litro como um consumo mínimo para ônibus como apontado em ANTP (2021). Com base nesses dados e observando as porcentagens que cabem aos carros e aos ônibus da mesma forma observada para o cálculo do consumo energético, tem-se:

Valor gasto por dia por pessoa (carro) =

$$= R\$ 5,8435 \times 3,57 \text{ km} / 9,46 \text{ km/l}$$

Valor gasto por dia por pessoa (carro) = R\$ 2,2052

e

Valor gasto por dia por pessoa (ônibus) =

$$= R\$ 4,5956 \times 3,975 \text{ km} / 2,7 \text{ km/l}$$

Valor gasto por dia por pessoa (ônibus) = R\$ 6,7657

Um veículo elétrico representa uma carga de aproximadamente 2 kW (Patil et al., 2020); se pensarmos em um ônibus essa carga seria maior. No entanto, para se utilizar um carregador que seja facilmente encontrado no mercado e que atenda a demanda, será adotado o WEG Webmob Wall G2 3,7 kW/110 V, que pode ser adquirido pelo valor de R\$ 7.035,00, e o sistema de geração solar compatível com o de 4,01 kWp com o custo médio atual de R\$ 23.847,78 de acordo com Portal Solar (2021). Somando os dois valores tem-se o custo total do sistema de geração solar, com o carregador, de R\$ 30.882,38.

Como a economia para carro é de R\$ 0,9616 entre o custo de combustível e o custo em kWh por dia, dividindo o valor do investimento por essa economia em termos mensais obtém-se aproximadamente 90 anos para o retorno do investimento, se considerado o investimento feito por uma pessoa. No caso de um ônibus a diferença é de R\$ 6,22 e o tempo de retorno do investimento do sistema seria de aproximadamente 14 anos. Isso, ressaltando novamente, se considerarmos um sistema de carregamento adquirido por pessoa, o que na grande maioria dos casos não é realístico. Portanto, o que deve ser considerado são os pontos de carregamento compartilhados em condomínios residenciais ou em pontos compartilhados por veículos que são usados como taxi ou veículos de aplicativos, e no caso dos ônibus, considerar que eles transportam 16.099 milhões de pessoas por ano ou 44 milhões pessoas por dia como apontado em ANTP (2018), e obviamente utilizam pontos de carregamento compartilhados nas garagens, por exemplo. Portanto refazendo os cálculos com base nessas premissas, esse tempo de retorno passa ser menor e mais atrativo. Trabalhos como o apresentado por Affonso e Kezunovic (2019) para uma instalação comercial no Texas, EUA, onde o sistema é compartilhado e ainda são considerados incentivos financeiros, mostram a viabilidade financeira, confirmando essa premissa.

Dado que o investimento individual em um sistema solar dedicado para o carregamento de veículos não se justifica economicamente, pode-se, portanto, reavaliar a viabilidade do investimento se for levado em conta que um indivíduo que deseja instalar um sistema como este vai utilizá-lo também para outros fins que não somente o carregamento veicular, por exemplo, a alimentação de uma residência. De acordo com

EPE (2021) o consumo médio atual de uma residência no Brasil é de 151,7 kWh, portanto calculando-se a economia mensal ao se instalar um sistema solar, tem-se:

Economia mensal de energia = Consumo x Preço médio + custo mensal mínimo da instalação

Economia mensal de energia = 151,7 kWh x R\$ 0,6345 por kWh - R\$ 31,59 (taxa mínima) = R\$ 64,66

Somando esse valor economizado na conta de energia com o valor economizado com o abastecimento do carro, tem-se:

Economia mensal = R\$64,66 + (R\$0,9616 x 30) = R\$ 93,50

Retorno no investimento = R\$ 30.882,38 / R\$ 93,50 por mês  $\approx$  330 meses  $\approx$  27 anos

Como a vida útil de um sistema de geração solar gira em torno de 25 anos, esse tipo de instalação continuaria inviável economicamente com base no cenário estudado. Em um cenário residencial, onde se considere um consumo maior de energia combinado com dois ou mais carros utilizando o sistema, por exemplo, o tempo de retorno do investimento seria menor que 25 anos, porém com o retorno ainda com longo prazo.

## V. CONCLUSÃO

Com base na metodologia utilizada e nos valores obtidos, se as estações de carregamento solar para automóveis forem coletivas ou, em se tratando de ônibus, que obviamente compartilharão o sistema de carregamento, o investimento aparentemente se justifica. Do contrário, a avaliação apresentada para um indivíduo torna o investimento pouco atrativo ou proibitivo para residências com baixo consumo. Sem um programa de subsídios que poderiam reduzir esses custos, uma alternativa é o desenvolvimento de sistemas mais baratos, de menor potência para o carregamento veicular, que demandariam um sistema de geração solar de menor tamanho, reduzindo o investimento e por consequência o tempo de retorno. Esse desenvolvimento será objeto de futuros estudo na área.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affonso, C. M; Kezunovic, M.; Technical and Economic Feasibility Analysis of a Solar-Powered Electric Vehicle Charging Station, 978-1-7281-1981-6, **IEEE**, 2019.

ANEEL, **Ranking das Tarifas - ANEEL**, <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>, acesso 16/10/2021;

ANEEL, **Bandeiras Tarifárias - ANEEL**, <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>, acesso 16/10/2021;

ANEEL. **Relatório do Acionamento das Bandeiras Tarifárias - agosto/2021**, <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/22537176/Relat%C3%B3rio+do+Acionamento+das+Bandeiras+Tarif%C3%A1rias+-+agosto-2021.pdf/c22c911a-bc5c-1443-dc5b-cf0587f2a6fa>, acesso 16/10/2021;

ANP, **Série histórica do levantamento de preços**, <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>, acesso 16/10/2021;

ANTP, **Simob 2018** (antp.org.br), <http://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacoes-da-mobilidade--simob--2018.pdf>, acesso 16/10/2021;

ANTP, <http://files.antp.org.br/2017/8/21/1.-metodo-de-calculo--final-impresso.pdf>, acesso 16/10/2021;

EPE, **Resenha Mensal - Agosto 2021 (base Julho).pdf** (epe.gov.br), [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-574/Resenha%20Mensal%20-%20Agosto%202021%20\(base%20Julho\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-574/Resenha%20Mensal%20-%20Agosto%202021%20(base%20Julho).pdf), acesso 16/10/2021;

Falkoni, A.; Pfeifer, A.; K; **Vehicle-to-Grid in Standard and Fast Electric Vehicle Charging: Comparison of Renewable Energy Source Utilization and Charging Costs**, **Energies**, MDPI, 2020;

INMETRO, **Tabelas de Consumo / Eficiência Energética Veículos Automotores Leves**, [http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos\\_leves\\_2020.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2020.pdf), acesso 16/10/2021;

Lee, Z. J.; Pang, J. Z. F.; Low, S. H.; **Pricing EV charging service with demand charge**, **Electric Power Systems Research** 189, 106694, Elsevier, 2020;

Patil, D.; Dubey, R. N.; Kulkarni, C.; Nadaf F.; Nair, D.; G. B., Ramesh; **Utilization of Solar Power for Automated Automotive and Locomotive Charging**, 2020 **International Conference for Emerging Technology (INCET)**, Belgaum, India, 2020;

Portal Solar, **Painel Solar: Preços e Custos de Instalação**, <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>, acesso 27/09/2021;

Shariff, S. M.; Alam, M. S.; Ahmad, F.; Rafat, Y.; Asghar, *M. S. J.*; Khan, S.; System Design and Realization of a Solar-Powered Electric Vehicle Charging Station, **IEEE Systems Journal**, vol. 14, n° 2, 2020;

Wu, Y.; Zhang, J.; Ravey, A.; Chrenko, D.; Miraoui, A; Real-time energy management of photovoltaic-assisted electric vehicle charging station by markov decision process, **Journal of Power Sources** 476, 228504, Elsevier, 2020.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***BARRIERS TO THE ADOPTION OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW***

### ***BARREIRAS À ADOÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS ÀS EDIFICAÇÕES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA***

Talita Mariane Cristino<sup>1</sup>  
Antonio Faria Neto<sup>2</sup>  
Otávio José de Oliveira<sup>3</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>4</sup>

***Resumo – O alto consumo de energia do setor de edificações tem exigido a adoção de medidas para reduzir sua demanda. Dentre as medidas existentes, a adoção dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações tem se destacado, uma vez que permitem que as edificações sejam transformadas de usuários a produtores de energia limpa. No entanto, apesar de seus benefícios, sua adoção ainda é tímida, devido a existência de barreiras. Sendo assim, esta pesquisa teve por objetivo identificar as barreiras que inibem a adoção de painéis fotovoltaicos (PV) integrados às edificações por meio de uma revisão da literatura. Como resultado, 23 barreiras foram identificadas, e agrupadas em cinco categorias de acordo com aspectos financeiros, governamentais, profissionais, sociais e design/estrutura. Os resultados alcançados podem ser úteis para a formulação de estratégias para a superação das barreiras identificadas.***

***Palavras-chave: Fontes de Energia Renovável. Sistemas Fotovoltaicos. Painéis Fotovoltaicos Integrados. Setor de Edificações. Barreiras.***

***Abstract – The high energy consumption of the building sector has required the adoption of measures to reduce its demand. Among the existing measures, the adoption of building integrated photovoltaic systems has stood out, as they allow buildings to be transformed from users to producers of clean energy. However, despite its benefits, its adoption is still low, due to the existence of barriers. Thus, this research aimed to identify the barriers that hinder the***

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: talita.cristino@unesp.br;

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: antonio.faria-neto@unesp.br;

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: otavio.oliveira@unesp.br;

<sup>4</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: teofilo.souza@unesp.br.

*adoption of building integrated photovoltaic systems by means of a literature review. As a result, 23 barriers were identified, and grouped into five categories according to financial, governmental, professional, social, and design/structure aspects. The results achieved can be useful for formulating strategies to overcome the identified barriers.*

**Keywords:** *Renewable Energy Sources. Photovoltaic Systems. Integrated Photovoltaic Panels. Buildings Sector. Barriers.*

## I. INTRODUÇÃO

O consumo de energia do setor que engloba as edificações residenciais, comerciais e públicas, tem ganhado destaque com o passar do tempo, uma vez que é responsável por cerca de 36% do consumo total de energia, e ainda por 40% do total das emissões de gases de efeito estufa (MAGHRABIE *et al.*, 2021). Além disso, sua demanda por eletricidade vem crescendo aceleradamente, trazendo consigo várias preocupações como a escassez dos recursos energéticos, e principalmente o aumento das emissões de gases de efeito estufa (ZHANG; WANG, 2013).

Portanto, é importante encontrar medidas que impactem na redução da demanda por energia e nas emissões de gases de efeito estufa, sem afetar o crescimento econômico das nações e o bem-estar dos ocupantes. De acordo com Maghrabie *et al.* (2021) uma medida, dentre as existentes, é a adoção de fontes de energia renovável, como por exemplo, a energia fotovoltaica.

Um dos subsetores emergentes da energia fotovoltaica são os sistemas fotovoltaicos integrados em edifícios (KOINEGG *et al.*, 2013; YANG e ZOU, 2015). Estes sistemas são considerados inovadores uma vez que permitem que as edificações sejam transformadas de usuários de energia a produtores de energia limpa (SHUKLA *et al.*, 2018; YANG, 2015). Além disso, podem ser parte funcional da estrutura da edificação, substituindo materiais convencionais utilizados no envelope da edificação (HEINSTEIN, BALLIF e PERRET-AEBI, 2013; YANG, 2015; YANG e ZOU, 2015; SHUKLA, SUDHAKAR e BAREDAR, 2016; ATTOYE *et al.*, 2018).

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia de 2019, a integração de sistema fotovoltaico no setor de edificações pode ser responsável por 60% do crescimento total da capacidade de energia mundial, ou seja, é uma medida potencial para a obtenção de eficiência energética, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento socioeconômico (LAU *et al.*, 2021).

No entanto, apesar de suas características e potenciais benefícios, sua adoção ainda é fraca e limitada, devido a existência de barreiras inibem a sua adoção (HIRST e BROWN, 1990; JAFFE e STAVINS, 1994).

Portanto, este artigo tem como principal objetivo identificar e classificar, a partir de uma revisão da literatura, as barreiras que inibem a adoção de painéis fotovoltaicos (PV) integrados às edificações. Tais resultados podem ser úteis para a formulação de políticas públicas e estratégias para a superá-las.

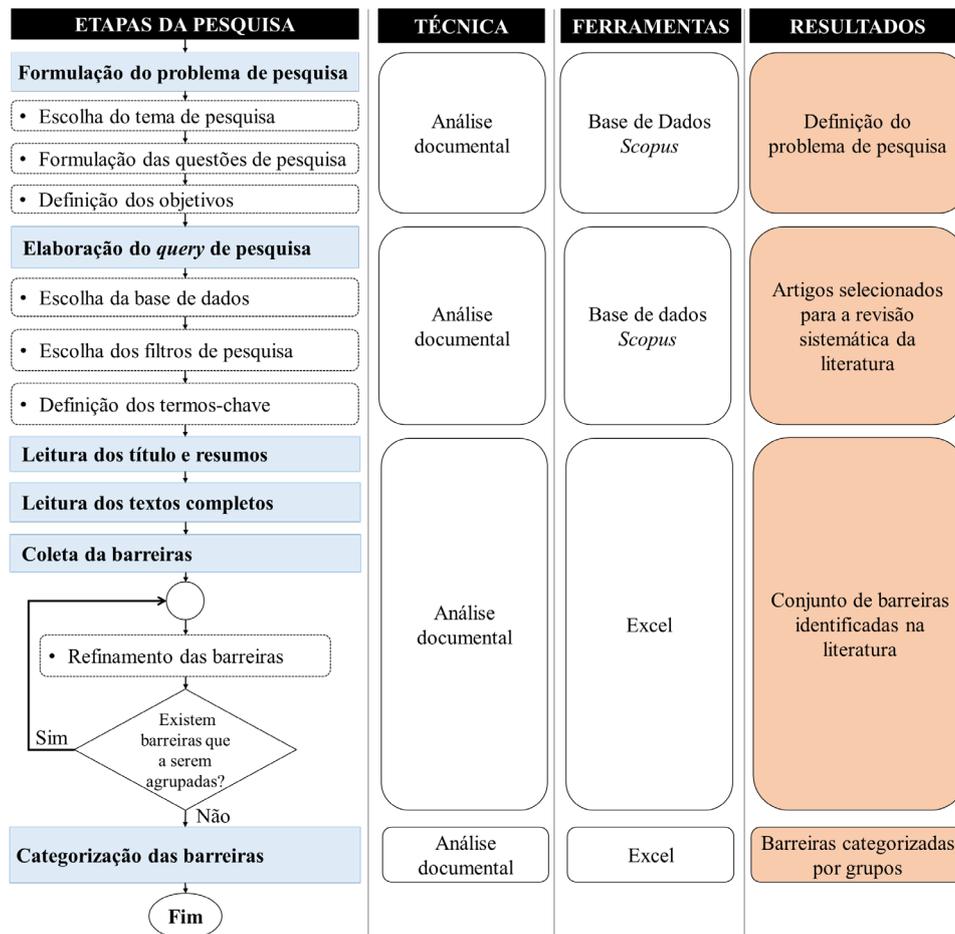
Esta pesquisa está organizada em quatro seções. A seção 2 apresenta em detalhe a abordagem metodológica empregada para realizar a pesquisa. A seção 3 apresenta a

descrição das barreiras e sua classificação em grupos. Finalmente, as conclusões são resumidas na Seção 4.

## II. METODOLOGIA

A revisão sistemática da literatura consistiu em seis etapas que são representadas pelo fluxograma ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do método de pesquisa



Fonte: Autores, 2021.

### 2.1 – Formulação do problema de pesquisa

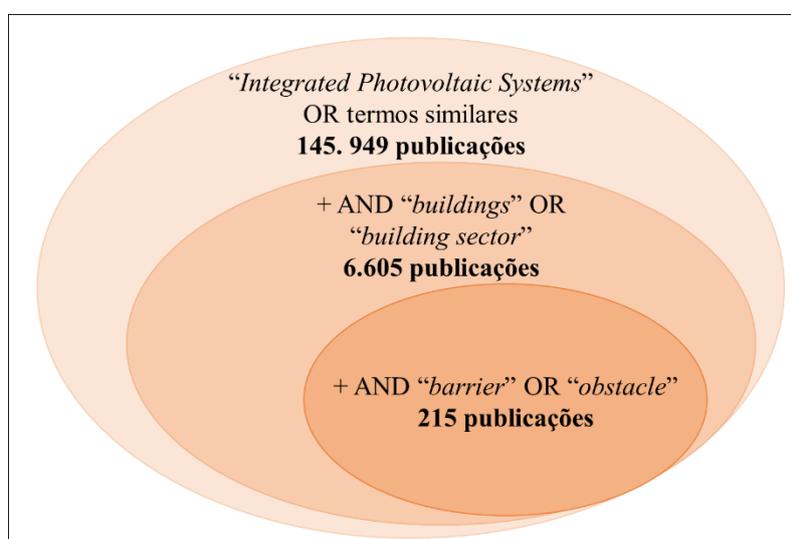
A primeira etapa da pesquisa consistiu na formulação do problema de pesquisa. Sendo assim, os pontos-chaves da pesquisa foram estabelecidos nesta etapa.

## 2.2 – Elaboração do query de pesquisa

O *query* de pesquisa com o qual fosse possível reunir um conjunto significativo de publicações que abordam as barreiras que impedem a adoção de painéis fotovoltaicos integrados às edificações foi elaborado.

A base de dados SCOPUS foi escolhida para esta pesquisa, uma vez que possui uma gama de periódicos de alto impacto. Além disso, a pesquisa foi realizada nos títulos, resumos e palavras-chaves. Foram considerados apenas artigos e revisões de periódicos publicados em inglês. E o período coberto para a busca na base de dados estendeu-se até 2021. As pesquisas realizadas estão resumidas na Figura 2.

Figura 2 – Pesquisas realizadas na base de dados SCOPUS



Fonte: Autores, 2021.

Como por ser visto na Figura 2, uma pesquisa preliminar foi feita utilizando o termo *"integrated photovoltaic systems"* e outros termos similares como *"BIPV"*, *"photovoltaic systems"* e *"building integrated PV"*. No total, foram recuperadas 145.949 publicações.

Uma nova pesquisa foi realizada, e os termos *"buildings"* e *"building sector"* foram acrescentados à pesquisa anterior, para delimitar os artigos relacionados aos PV integrados às edificações. A partir da pesquisa, foram identificadas 6.605 publicações.

Em seguida, os termos mais restritivos *"barrier"* e *"obstacle"* foram incluídos. Essa consulta final retornou 215 artigos que possivelmente poderiam conter alguma barreira à adoção de PV integrados às edificações.

## 2.3 – Leitura dos títulos e resumos dos artigos

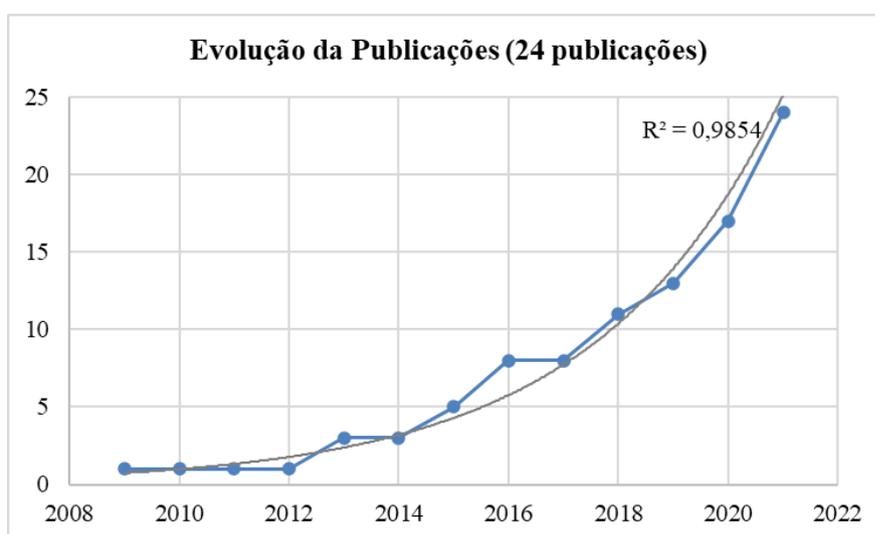
Esta etapa abrangeu a leitura dos títulos e resumos de cada um dos 215 artigos reunidos no final da etapa anterior. O principal objetivo desta etapa foi isolar aquelas

publicações que tratam de qualquer obstáculo à adoção de PV integrados às edificações daquelas em que os termos “*barrier*” e “*obstacle*” apareceram acidentalmente. Portanto, ao final dessa etapa, o número de artigos elegíveis para posteriores análises reduziu para 54.

#### 2.4 – *Leitura completa dos artigos*

Posteriormente, o texto completo de cada um dos 54 artigos foi lido para garantir que nenhuma informação relevante fosse perdida. Assim, todas as publicações que abordassem algum tipo de obstáculo foram selecionadas. Como resultado, 24 textos considerados elegíveis uma vez que apresentaram alguma barreira. A Figura 3 mostra a distribuição temporal desses artigos.

Figura 3 – A distribuição temporal dos 24 artigos



Fonte: Autores, 2021.

O primeiro artigo selecionado para revisão de literatura que tratava das barreiras foi publicado em 2009 (URMEE e HARRIES, 2009). Poucos artigos cobrindo este assunto foram publicados até 2015, a partir disso, o número de publicações cresceu, chegando a sete artigos publicados no ano de 2021. Além disso, é possível ver que a evolução das publicações vem crescendo exponencialmente e ainda não atingiu o ponto de inflexão; portanto, o amadurecimento do tema ainda não foi alcançado, ou seja, ainda existem aspectos a serem explorados.

#### 2.5 – *Coleta das barreiras*

O próximo passo foi reunir as barreiras contidas nos 24 artigos. Inicialmente, 173 barreiras foram coletadas. No entanto, percebeu-se que a maioria das barreiras apresentaram um significado semelhante, por exemplo “falta de conhecimento técnico” e

“falta de conhecimento profissional”; “falta de conscientização pública” e “falta de consciência dos usuários”; “falta de projetos pilotos” e “falta de projetos de demonstração”; “falta de apoio do governo” e “falta de suporte governamental”, etc. Portanto, foi importante agrupar as barreiras semelhantes.

Como resultado, as 173 barreiras foram reduzidas para 47. No entanto, a semelhança entre algumas barreiras não era tão óbvia, assim uma leitura mais aprofundada foi necessária, para identificar o contexto em que a barreira foi abordada. Após esta nova rodada de leituras, o conjunto final foi composto por 23 barreiras.

## 2.6 – Categorização das barreiras

As barreiras coletadas nesta pesquisa surgem à luz de vários aspectos. Por exemplo, quando o assunto é abordado do ponto de vista governamental, várias barreiras surgem em relação a ele. Da mesma forma, tais barreiras podem surgir à luz de aspectos tecnológicos, sociais, financeiros e assim por diante. Portanto, foi importante categorizar tais barreiras em grupos, permitindo assim alcançar uma ampla compreensão do assunto estudado.

Assim, a partir disso, foi possível categorizar as 23 barreiras em cinco grupos denominados de acordo com aspectos financeiros, governamentais, profissionais, sociais e *design*/estrutura.

## III. RESULTADOS

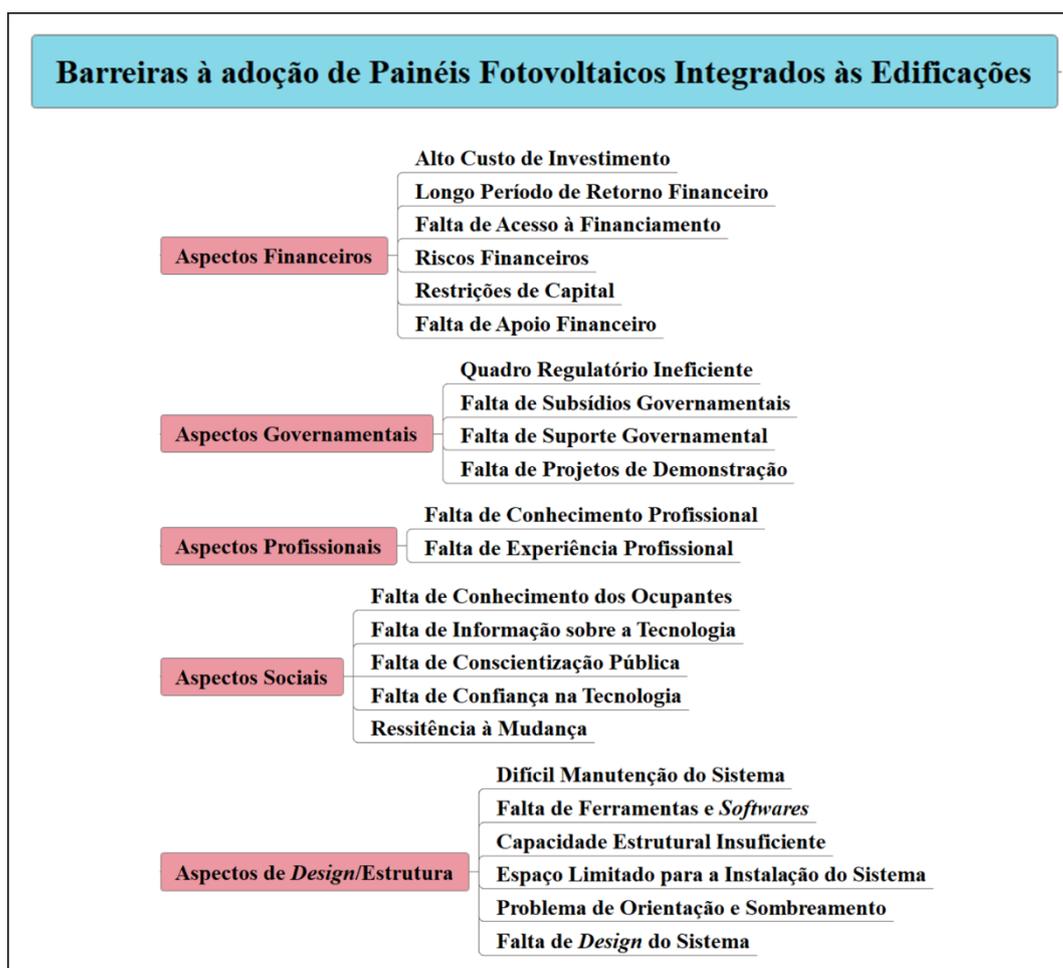
A revisão da literatura examinou as barreiras que impedem a adoção de PV integrados às edificações. As barreiras encontradas foram categorizadas em cinco grupos conforme apresentado na Figura 4.

### 3.1 – Barreiras relacionadas aos aspectos financeiros

Esse grupo reúne barreiras relacionadas a questões financeiras. A Tabela 1 mostra as barreiras nomeadas de acordo com sua frequência de aparecimento na literatura seguida do número de publicações que trataram cada barreira.

Os PV integrados às edificações requerem alto custo de investimento para os proprietários, construtores e empreendedores (KOINEGG *et al.*, 2013; YANG e ZOU, 2015; ASHOUR *et al.*, 2021; REINDL e PALM, 2021). Normalmente, os PV requerem maior investimento do que as tecnologias convencionais que vêm sendo adotadas no setor (URMEE e HARRIES, 2009; LU *et al.*, 2019; MAGHRABIE *et al.*, 2021).

Figura 4 – Barreiras identificadas na literatura



Fonte: Autores, 2021.

Tabela 1 – Barreiras financeira.

Barreiras Financeiras	Número de Publicações
Alto custo de Investimento	16
Longo Período de Retorno Financeiro	6
Falta de Acesso a Financiamento	5
Riscos Financeiros	4
Restrições de Capital	4
Falta de Apoio Financeiro	4

Fonte: Autores, 2021.

É interessante notar que o longo período de retorno financeiro é um outro ponto que impede a adoção dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, pois muitos investidores/proprietários preferem investir em projetos com uma alta taxa de retorno, e

ainda que sejam de curto período e com baixo investimento inicial (ELEFTHERIADIS e ANAGNOSTOPOULOU, 2015; SHUKLA *et al.*, 2018; ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019; REINDL e PALM, 2021). Sendo assim, muitos deles optam por outras tecnologias que possuem essas características de investimento (LU *et al.*, 2019; ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019).

Além disso, é difícil acessar linhas de financiamento que facilitem a integração de PV nas edificações (LANG, AMMANN e GIROD, 2006; FRANGOU *et al.*, 2018; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021). Segundo Eleftheriadis e Anagnostopoulou (2015) e Shukla *et al.* (2018), poucas instituições financeiras estão dispostas a oferecer linhas de crédito, uma vez que os tais projetos requerem alto investimento inicial e existem incertezas sobre seus possíveis riscos financeiros.

De acordo com Lan, Ammanan e Girod (2006) e Xue, Lindkvist e Temeljotov (2021), existem diferentes tipos de incertezas no processo de adoção dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, que acabam dificultando a adoção de tal tecnologia. Dentre as incertezas existentes, destaca-se os riscos em se investir em PV integrados às edificações, por exemplo, os potenciais investidores não têm certeza sobre a quantidade de eletricidade que o sistema pode gerar, ou ainda sobre as previsões reais do retorno financeiro (ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019; ZANDER, 2020; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021).

Além disso, o dinheiro adicional necessário para pagar por tal tecnologia também é visto como um problema, uma vez que as restrições de capital inibem a escolha por PV integrados nas edificações (ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019; REINDL e PALM, 2021;). Muitos os interessados não possuem renda suficiente para cobrir os custos iniciais de tais projetos, tornando inviável a adoção da tecnologia (URMEE e HARRIES, 2009; KIZILCEC e PARIKH, 2020).

Sendo assim, os incentivos financeiros são vitais para a disseminação das tecnologias voltadas a economia de energia no setor de edificações (ASHOUR *et al.*, 2021; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021). No entanto, há uma carência de apoio financeiro, uma vez que existem conservadores políticos com conhecimento limitado sobre o mercado fotovoltaico (LANG, AMMANN e GIROD, 2006; URMEE e HARRIES, 2009; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021).

### 3.2 – Barreiras relacionadas aos aspectos governamentais

Os aspectos governamentais desempenham um papel importante na adoção de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações. As barreiras governamentais estão listadas na Tabela 2, juntamente com número de publicações.

Tabela 2 – Barreiras governamentais.

Barreiras Governamentais	Número de Publicações
Quadro Regulatório Ineficiente	13
Falta de Subsídios Governamentais	6
Falta de Suporte Governamental	4
Falta de Projetos de Demonstração	3

Fonte: Autores, 2021.

Muitos países não incluem critérios requeridos para projetos de PV integrados às edificações no quadro regulatório (YANG, 2015; MAGHRABIE *et al.*, 2021). Consequentemente, existem deficiências políticas, regulamentações e códigos voltados especificamente à adoção dessa tecnologia (URMEE e HARRIES, 2009; SHUKLA, SUDHAKAR e BAREDAR, 2016; SHUKLA *et al.*, 2018; AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2020). Segundo Lu *et al.* (2019), Reindl e Palm (2021) e Kim (2021), as instruções presentes no quadro regulatório são complicadas de interpretar e aplicar nos projetos desenvolvidos.

Outra barreira identificada é a falta de subsídios disponibilizados pelo governo com forma de apoio e incentivo à adoção dos PV integrados às edificações (URMEE e HARRIES, 2009; SHUKLA *et al.*, 2018; LU *et al.*, 2019; ASHOUR *et al.*, 2021; MAGHRABIE *et al.*, 2021; REINDL e PALM, 2021).

Além disso, os quadros regulatórios apresentam diversas políticas de apoio voltadas para o mercado PV no geral, no entanto, há poucas políticas voltadas especificamente para a integração de PV no setor de edificações (YANG e ZOU, 2015; KIM, 2021). Isso mostra a falta de suporte governamental específico para a adoção de tal tecnologia. Tal barreira impacta em todo o processo, desde o custo de fabricação dos componentes dos PV até a disposição dos usuários em adotar tal tecnologia (YANG e ZOU, 2015. SHUKLA *et al.*, 2018; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021).

Além disso, existem poucos projetos de demonstração apoiados pelo governo (KOINEGG *et al.*, 2013; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021). Segundo Lu *et al.* (2019), projetos limitados levam a oportunidades limitadas para o mercado de energia fotovoltaica no setor de edificações, uma vez que os dados de desempenho, custos e benefícios atrelados à tecnologia são o alicerce básico para alavancar a sua adoção no setor.

### 3.3 – Barreiras relacionadas aos aspectos profissionais

Barreiras profissionais agrupam problemas relacionados aos envolvidos no desenvolvimento de projetos e instalação dos painéis fotovoltaicos nas edificações. A Tabela 3 apresenta as barreiras encontradas, bem como o número de publicações.

Tabela 3 – Barreiras profissionais.

<b>Barreiras Profissionais</b>	<b>Número de Publicações</b>
Falta de Conhecimento Profissional	7
Falta de Experiência Profissional	4

Fonte: Autores, 2021.

Do ponto de vista de Urmee e Harries (2009), Shukla *et al.* (2018), e Ashour *et al.* (2021), os profissionais envolvidos em projetos que integram os PV em edificações possuem pouco conhecimento na área, e ainda há uma baixa consciência sobre o funcionamento e *design* adequado desses sistemas.

Além disso, a falta de experiência profissional influencia significativamente nos projetos fotovoltaicos, uma vez que não há uma compreensão prática sobre a tecnologia, fazendo com que os interessados relutem em encontrar tais profissionais para desenvolver seus projetos voltados para o setor de edificações (ELEFThERiADiS e ANAGNOSTOPOULOU, 2015; SHUKLA *et al.*, 2018; ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019; KIM, 2021).

### 3.4 – Barreiras relacionadas aos aspectos sociais

As principais barreiras dentro deste grupo estão relacionadas a aspectos sociais que são determinantes para a integração de PV nas edificações. As barreiras são listadas na Tabela 4, juntamente com o número de publicações.

Tabela 4 – Barreiras sociais.

<b>Barreiras Sociais</b>	<b>Número de Publicações</b>
Falta de Conhecimento dos Ocupantes	10
Falta de Informação sobre a Tecnologia	8
Falta de Conscientização Pública	5
Falta de Confiança na Tecnologia	4
Resistência à Mudança	4

Fonte: Autores, 2021.

O conhecimento inadequado por parte dos usuários da tecnologia é um obstáculo que leva a incompreensão dos benefícios atrelados à economia de energia e retorno financeiro (SHUKLA *et al.*, 2018; AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2020; KIZILCEC e PARIKH, 2020; SHAFIQUE, LUO e ZUO, 2020). A falta de conhecimento

pode levar ao uso não ideal do sistema que acarreta ao desinteresse do usuário em relação a tecnologia integrada à edificação (KOINEGG *et al.*, 2013; YANG e ZOU, 2015; REINDL e PALM, 2021; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021).

Além disso, muitos proprietários e ocupantes possuem dificuldade em encontrar informações sobre os sistemas e possibilidades de integrar os PV em suas edificações (SHUKLA *et al.*, 2018; REINDL e PALM, 2021; XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021). Muitos interessados sabem pouco sobre os possíveis benefícios atrelados a tecnologia, devido ao número limitado de informações disponíveis a eles (ATTOYE *et al.*, 2018; ROBERTS, BRUCE e MACGILL, 2019; LAU *et al.*, 2021), ou seja, as informações confiáveis sobre custos, incentivos e benefícios são difíceis de encontrar (XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021).

A falta de conscientização do usuário sobre a necessidade de se reduzir o consumo de energia é outro obstáculo que impede à adoção de sistemas fotovoltaicos que leva os usuários a serem relutantes em optar por tal tecnologia (ATTOYE *et al.*, 2018; ESLAMI *et al.*, 2021).

Existe uma falta de confiança nas informações declaradas por aqueles que comercializam os PV integrados às edificações, uma vez que muitos usuários não possuem confiança necessária para fazer um investimento a longo prazo (FRANGOU *et al.*, 2018; LAU *et al.*, 2021). A insegurança surge devido a incompreensão sobre a duração real da vida técnica e retorno financeiro projetado para os sistemas integrados às edificações (ATTOYE *et al.*, 2018; REINDL e PALM, 2021, ZANDER, 2020).

Tais barreiras levam os usuários terem resistência às mudanças que podem surgir pela integração de sistemas fotovoltaicos em suas edificações (XUE, LINDKVIST e TEMELJOTOV-SALAJ, 2021). De acordo com Reindl e Palm (2021), os usuários têm medo de que o desempenho do sistema não atenda às suas expectativas. Outra resistência é o progresso rápido desta tecnologia, que leva os usuários a pensarem que os PV integrados estarão desatualizados antes mesmo que haja retorno do capital investido, o que acaba retardando a sua adoção no setor de edificações (REINDL e PALM, 2021).

### 3.5 – Barreiras relacionadas ao design e estrutura

Existem aspectos voltados ao *design* e estrutura dos projetos de edificações que acabam impedindo a adoção de PV integrados. As barreiras são apresentadas na Tabela 5, juntamente com o número de publicações.

A difícil manutenção dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações é uma barreira apontada na literatura (LU *et al.*, 2019; KIZILCEC e PARIKH, 2020; KIM, 2021). Segundo Lau *et al.* (2021) e Maghrabre *et al.* (2021), os *designers* de projetos fotovoltaicos precisam estar atentos à substituição e manutenção dos componentes do sistema. Os módulos fotovoltaicos integrados precisam de manutenção especial, e em muitos casos os profissionais envolvidos não se preocupam com os procedimentos e cuidados necessários para a manutenção do sistema (LU *et al.*, 2019; AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2020).

Tabela 5 – Barreiras de design e estrutura.

Barreiras de <i>Design</i> e Estrutura	Número de Publicações
Difícil Manutenção do Sistema	7
Falta de Ferramentas e <i>Softwares</i>	5
Capacidade Estrutural Insuficiente	4
Espaço Limitado	3
Problemas de Orientação/Sombreamento	3
Falta de <i>Design</i> do Sistema	2

Fonte: Autores, 2021.

Outra barreira é a falta de ferramentas e softwares que apoiem o processo de *design* e monitoramento dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações (FRANGO *et al.*, 2018; AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2020; LAU *et al.*, 2021). Uma vez que o monitoramento do desempenho energético do sistema, facilita o processo de manutenção (FRANGO *et al.*, 2018; SHUKLA *et al.*, 2018; MAGHRABIE *et al.*, 2021).

De acordo com Lu *et al.* (2019), existem alguns impedimentos relacionados à capacidade estrutural das edificações. Essa barreira surge uma vez que muitas edificações existentes não foram projetadas para suportar o peso dos componentes de um sistema fotovoltaico, podendo acarretar o colapso/desabamento da edificação (YANG, 2015; MAGHRABIE *et al.*, 2021; REINDL e PALM, 2021).

Muitos projetos de edificações já existentes são reformados para a possibilidade de instalação de um PV integrado (ASHOUR *et al.*, 2021). No entanto, uma barreira relacionada é o espaço limitado na edificação para a instalação da tecnologia, diminuindo assim a sua adoção no setor (KIM, 2021; REINDL e PALM, 2021).

Outra barreira destacada, é a falta de um design atraente dos PV edificações, o que leva ao desinteresse, por parte dos investidores e proprietários, em optar por tal tecnologias em seus projetos (ZANDER, 2020; ESLAMI *et al.*, 2021). Além disso, existe alguns problemas em relação ao posicionamento dos painéis fotovoltaicos na estrutura da edificação, o que pode influenciar na orientação e sombreamento da edificação (AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2020; LAU *et al.*, 2021; REINDL e PALM, 2021).

#### IV. CONCLUSÃO

Este artigo identificou 23 barreiras que impedem a adoção de PV integrados às edificações por meio de uma revisão de literatura. Além disso, classificou tais barreiras em cinco categorias voltadas aos aspectos financeiros, governamentais, profissionais, sociais e design/estrutura.

A partir da revisão de literatura, foi possível identificar que as barreiras relacionadas com os aspectos financeiros têm grande impacto na adoção dos PV integrados às edificações, uma vez que foi o grupo com barreiras mais citadas na literatura. O segundo grupo de barreiras mais impactante foi o relacionado aos aspectos sociais, seguido pelo grupo de barreiras governamentais. Portanto, o desenvolvimento de ações para superar tais barreiras é fundamental. Já os grupos relacionados aos aspectos profissionais e *design*/estrutural apresentam barreiras que foram menos abordadas na literatura, sugerindo assim que são as menos influentes.

Como sugestão para futuras pesquisas, é importante avaliar a viabilidade e eficácia de estratégias para a superação das principais barreiras. Seria ainda valioso propor diretrizes para que tais estratégias sejam adotadas. Além disso, existe a possibilidade de se estudar o grau de importância das barreiras identificadas na literatura para diferentes contextos geográficos. Por fim, os resultados deste artigo podem ser úteis para a formulação de políticas públicas, uma vez que identificou algumas barreiras a adoção de PV integrados às edificações.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGATHOKLEOUS, Rafaela A; KALOGIROU, Soteris A. Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems. **Energy**, v. 191, n. 116471, p. 1-8, 2020.

ASHOUR, Abshir M; THOMAS, Selvin P; AINA, Yusuf; SOPIAN, Kamaruzzaman; IBRAHIM, Adnan; MOHAMAD, Taib Iskandar; SYED, Azeem; SOPIAN, Kamaruzzaman Bin. Deployment of Rooftop Solar Photovoltaic Electrification for Residential Buildings in an Industrial City: A Study on Public Perception and Acceptance. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 11, n. 2, p. 945-951, 2021.

ATTOYE, Daniel Efurosibina; ADEKUNLE, Timothy O; AOUL, Kheira Anissa Tabet; HASSAN, Ahmed; ATOYE Samuel Osekafore. A Conceptual Framework for a Building Integrated Photovoltaics (BIPV) Educative-Communication Approach. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 1-21, 2018.

ELEFTHERIADIS, Iordanis M; ANAGNOSTOPOULOU, Evgenia G. Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources. **Energy Policy**, v. 80, p. 153–164, 2015.

ESLAMI, Hossein; NAJEM, Sara; GHANEM, Dana Ani; AHMAD, Ali. The potential of urban distributed solar energy in transition economies: The case of Beirut city. **Journal of Environmental Management**, v. 285, n. 112121, p. 1-10, 2021.

FRANGOU, Maria; ARYBLIA, Maria; TOURNAKI, Stavroula; TSOUTSOS, Theocharis. Renewable energy performance contracting in the tertiary sector standardization to overcome barriers in Greece. **Renewable Energy**, v. 125, p. 829-839, 2018.

HEINSTEIN, Patrick; BALLIF, Christophe; PERRET-AEBI, Laure-Emmanuelle. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. **Green**, v. 3, p.125-156, 2013.

HIRST, Eric; BROWN, Marilyn. Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. **Resource Conservation Recycling**, v. 3, n. 4, p. 267–281, 1990.

JAFFE, Adam B; STAVINS Robert N. The energy efficiency gap: what does it mean?, **Energy Policy**, v. 22, n. 10, p. 804–810, 1994.

KIM, Chul. A review of the deployment programs, impact, and barriers of renewable energy policies in Korea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, n. 110870, p. 1-18, 2021.

KIZILCEC, Vivien; PARIKH, Priti. Solar Home Systems: A comprehensive literature review for Sub-Saharan Africa. **Energy for Sustainable Development**, v. 58, p. 78–89, 2020.

KOINEGG, Johann; BRUDERMANN, Thomas; POSCH, Alfred; MROTZEK, Maximilian. “It Would Be a Shame if We Did Not Take Advantage of the Spirit of the Times ...” - An Analysis of Prospects and Barriers of Building Integrated Photovoltaics. **GAIA - Ecological Perspectives on Science and Society**, v. 22, n. 1, p. 39-45, 2013.

LANG, Tillmann; AMMANN, David; GIROD, Bastien. Profitability in absence of subsidies: A techno-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings. **Renewable Energy**, v. 87, p. 77-87, 2016.

LAU, Siu-Kit; KOROSIC, Vesna; BIERI, Monika; NOBER, André M. Identification of factors influencing development of photovoltaic (PV) implementation in Singapore. **Sustainability**, v. 13, n. 2630, p. 1-30, 2021.

LU, Yujie; CHANG, Ruidong; SHABUNLO, Veronika; YEE, Amy Tan Lay. The implementation of building-integrated photovoltaics in Singapore: drivers versus barriers. **Energy**, v. 168, p 400-408, 2019.

MAGHRABIE, Hussein M; ELSAID, Khaled; SAYED, Enas; ABDELKAREEM, Mohammad Ali, WILBERFORCE, Tabbi; OLABI, A G. Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) systems: Applications and challenges. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, n. 101151, p. 1-15, 2021.

REINDL, Katharina; PALM, Jenny. Installing PV: Barriers and enablers experienced by non-residential property owners. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, n. 110829, p. 1-10, 2021.

ROBERTS, Mike B; BRUCE, Anna; MACGILL, Iain. Opportunities and barriers for photovoltaics on multi-unit residential buildings: Reviewing the Australian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 104, p. 95-110, 2019.

SHAFIQUE, Muhammad; LUO, Xiaowei; ZUO, Jian. Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. **Solar Energy**, v. 202, p. 485–497, 2020.

SHUKLA, Akash Kumar; SUDHAKAR, K; BARENDAR, Prashant. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 99-110, 2016

SHUKLA, Akash K; SUDHAKAR, Kumar; BARENDAR, Prashant; MAMAT, Rizalman. BIPV based sustainable building in South Asian countries. **Solar Energy**, v. 170. P 1162-1170, 2018.

URMEE, Tania; HARRIES, David. A survey of solar PV program implementers in Asia and the Pacific regions. **Energy for Sustainable Development**, v. 13, p. 24-32, 2009.

XUE, Yan; LINDKVIST, Carmel Margaret; TEMELJOTOV-SALAJ, Alenka. Barriers and potential solutions to the diffusion of solar photovoltaics from the public-private-people partnership perspective – Case study of Norway. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, n. 110636, p. 1-12, 2021.

YANG, Rebecca Jing. Overcoming technical barriers and risks in the application of building integrated photovoltaics (BIPV): hardware and software strategies. **Automation in Construction**, v. 51, p. 92-102, 2015.

YANG, Rebecca Jing; ZOU, Patrick X W. Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. **International Journal of Construction Management**, v. 16, n. 1, p. 39-53, 2015.

ZANDER, Kerstin K. Unrealised opportunities for residential solar panels in Australia. **Energy Policy**, v. 142, n. 111508, p. 1-9, 2020.

ZHANG, Yurong; WANG, Yuanfeng. Barriers' and policies' analysis of China's building energy efficiency. **Energy Policy**, v. 62, p. 768-773, 2013.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES - Código Financeiro 001), e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - processo 2021 / 01423-9) pelo apoio a esta pesquisa.

## VIII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***STUDY OF THE APPLICATION OF 3D PRINTING FOR MANUFACTURING ELECTRIC VEHICLES***

### ***ESTUDO DA APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D PARA MANUFATURA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS***

Jonas Cardoni Neto<sup>1</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>2</sup>

***Resumo – As sociedades contemporâneas têm se desenvolvido, recentemente, no preâmbulo da sustentabilidade e da eficiência. As indústrias, seguindo essas tendências mundiais, adaptam suas formas e métodos de produção para continuar a serem relevantes em um período de rápidas mudanças e de necessidades cada vez mais específicas. Assim, neste projeto, é estudado um modelo de fabricação de peças que converge aos ideais apresentados, sendo eficiente e flexível, podendo produzir com menos desperdício e podendo mudar seus moldes mais facilmente. Esse método é o da impressão 3D, que é analisado, neste contexto, na capacidade de manufatura da carroceria de veículos elétricos.***

***Palavras-chave: Manufatura aditiva. Carros elétricos. Sustentabilidade.***

***Abstract - Contemporary societies have recently developed in the preamble of sustainability and efficiency. Industries, following these global trends, adapt their forms and production methods to continue to be relevant in a period of rapid change and increasingly specific needs. Thus, in this project, a method for manufacturing parts is conceived that converges to the presented ideals, being efficient and flexible, and also being able to produce with less waste and change molds easily. This method is the 3D printing, which is analyzed, in this context, in the manufacturing of the body of electric vehicles.***

***Keywords: Additive manufacturing. Electric cars. Sustainability.***

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [jonas.neto@unesp.br](mailto:jonas.neto@unesp.br);

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [teofilo.souza@unesp.br](mailto:teofilo.souza@unesp.br).

## I. INTRODUÇÃO

A Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, foi uma das primeiras reuniões de líderes globais que almejava explicitar a importância da sustentabilidade no desenvolvimento das nações. A iniciativa, assim, gerou uma série de estudos, pesquisas e ações com políticas de gerenciamento ambiental que, até a atualidade, influenciam as relações interpessoais com o ecossistema mundial. Essa conferência foi decisiva para o surgimento de acordos que demandam o engajamento total dos Estados, auxiliando-se mutuamente para conservar o ambiente ao qual a humanidade está inexoravelmente arraigada (NOGUEIRA, 2009).

Dentre os diversos fatos constituídos a partir de alianças internacionais para a conservação do meio ambiente e para o desenvolvimento sustentável, o aquecimento global mostrou-se uma relevante problemática para a contemporaneidade. Nesse sentido, os combustíveis fósseis, utilizados por diversos setores das economias nacional e mundial, são grandes poluidores atmosféricos, emitindo quantidades consideráveis de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) quando é realizada a sua combustão.

No Brasil, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020), cerca de 19% das emissões de CO<sub>2</sub> são oriundas do setor de energia, sendo que, desse montante, cerca de 47% são gerados pela categoria de transportes. Diante de tal fato, a indústria de transportes busca soluções que sejam menos agressivas ao meio ambiente e reduzidas em questão de emissões de gases de efeito estufa, ações que têm popularizado os veículos com propulsão elétrica (SILVA, 2020).

Além de diminuir a emissão de gases causadores do efeito estufa, os veículos elétricos buscam amenizar outros problemas ambientais, como a produção excessiva de resíduos industriais sólidos e de efluentes líquidos e gasosos. Assim, vários projetos atuais nos setores industriais são trabalhados para tornar a fabricação mais eficiente e menos devastadora para os recursos naturais, utilizando conceitos de manufatura enxuta (*Lean Manufacturing*), padronização e flexibilização da produção conforme a demanda (LEDESMA, 2019).

Nesse contexto insere-se a manufatura aditiva, que se caracteriza por ser uma técnica automatizada para gerar produtos físicos diretamente a partir de informações CAD 3D. O termo “aditivo” é dado porque esse processo é feito pela adição sistemática de camadas de determinados materiais, de modo que geometria, dimensão e superfície obtidas são próximas da qualidade final do produto, não exigindo os convencionais métodos de usinagem. Consequentemente, o tempo de desenvolvimento de produtos é diminuído, aumentando o valor agregado ao passo que recursos personalizáveis são incorporados (ALBERTIN, 2017).

Ademais, há na impressão 3D maior sustentabilidade do que os métodos fabris tradicionais da indústria. Nesse sentido, manufatura sustentável é definida como um processo de criação que minimiza os impactos ambientais e os gastos energéticos, além de conservar recursos naturais. Paralelamente, ao passo que a manufatura aditiva permite a fabricação de peças mais complexas pela adição direta das camadas de material, é possível diminuir o número de componentes em um dispositivo, implicando menor número de peças a se produzir e peso final reduzido. Consequentemente, consome-se menos recursos naturais e energia, além do desperdício mínimo, porque as peças fabricadas têm o formato e as dimensões do produto final, eliminando outras etapas que geram resíduos (MANI, 2014).

Nesta pesquisa, fundamentando-se em um veículo elétrico presente no câmpus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, foram estudadas, em convergência com os ideais supracitados, as possibilidades de utilização da impressão 3D na manufatura de carros elétricos, implicando a fabricação mais consciente e eficiente. Ademais, evidenciaram-se propostas para democratizar o acesso ao carro elétrico, acompanhando tendências mundiais de desenvolvimento sustentável em prol da sociedade.

## II. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido tendo-se como base o veículo elétrico EV5010, fabricado pela montadora chinesa Kandi, atualmente presente no câmpus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. O modelo tem uma carroceria do tipo hatchback, é compacto e possui capacidade de duas pessoas. As baterias, que são de chumbo, localizam-se sob o assoalho, enquanto que o motor está na traseira, abaixo do espaço do porta-malas. A imagem da figura 1 apresenta o carro, sendo possível identificar algumas das características principais mencionadas.

Figura 1 - Imagem do carro EV5010, Kandi.



Fonte: Autor, 2021.

As análises foram feitas considerando as principais dimensões do carro EV 5010, como altura, largura, comprimento e distância entre-eixos, estando as medições enumeradas na tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões do EV5010, Kandi.

	<b>Tamanho (cm)</b>
Altura	159
Largura	143
Comprimento	285
Entre-eixos	207
Altura livre do solo	21

A partir das especificações conhecidas, uma pesquisa aprofundada foi feita sobre os tipos de materiais que usualmente são empregados na fabricação das peças externas da carroceria, levando em consideração, também, outros materiais não convencionais, dada a necessidade do projeto de imprimir em 3D as partes do veículo.

No que tange à utilização da impressora 3D na fabricação das peças, foi realizada uma pesquisa para entender quais materiais, dentre os já pesquisados, podem ser por ela trabalhados, apresentando um levantamento de certas características, como: densidade, temperatura de fusão e tensão de escoamento. Os resultados da pesquisa foram elencados em relação à algumas prioridades do projeto, como: custo de obtenção, facilidade de ser trabalhado, disponibilidade de empresas locais para manusear os componentes e qualidades mecânicas.

Os principais materiais foram escolhidos e, assim, algumas pesquisas foram feitas para identificar a possibilidade de compor as peças veiculares com esses tipos de materiais.

### III. RESULTADOS

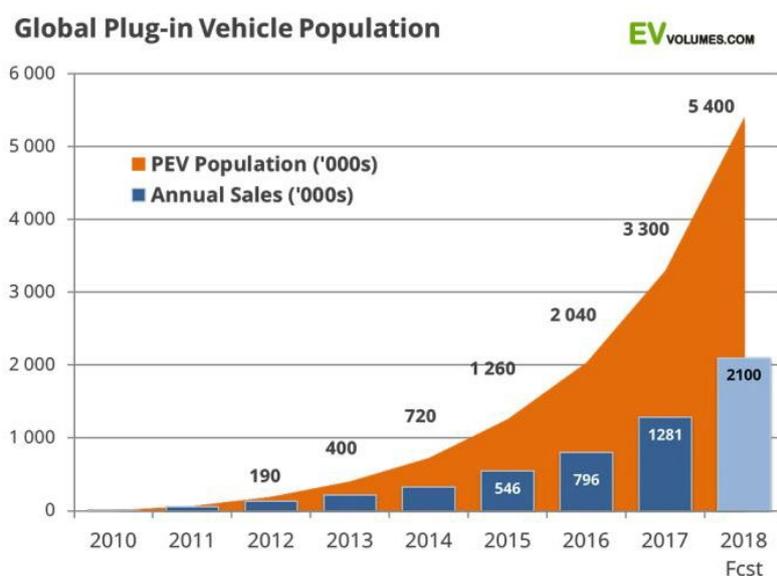
Conforme novas pesquisas e estudos são realizados, torna-se mais clara a problemática do conciliamento entre desenvolvimento e sustentabilidade. Todavia, essas informações reiteram a urgência de aplicar tecnologias alternativas para atenuar as mazelas causadas pelo atual modelo exploratório dos materiais naturais e da sociedade. Assim, é válido analisar algumas mudanças em áreas tecnológicas importantes, as quais influenciam esta pesquisa e permitem a execução projetos de manufatura aditiva.

#### *3.1 – Popularização dos carros elétricos*

A cada ano os carros elétricos tornam-se mais populares. Em alguns países, como a China, os veículos mais vendidos nessa categoria são os *LSEVs (Low Speed Electric Vehicle)*, que são menores e mais simples, atingindo menor velocidade. Na Europa, os mais comuns também são compactos, visto a tradição e as preferências culturais de vários países do continente. No entanto, ao contrário da nação asiática, os carros europeus são mais equipados, atendendo a rígidas exigências dos órgãos de regulação e de segurança dos automóveis da região, elevando seus custos de produção e de aquisição. Assim, observa-se que o mercado chinês de veículos elétricos avança ainda mais rapidamente, permitindo acesso mais fácil aos produtos por maior parte da população.

O gráfico a seguir demonstra a variação das vendas anuais de carros elétricos, tal como a evolução do número total.

Figura 2 – Vendas anuais e total de veículos elétricos no mundo.



Fonte: S&P Global Platts, 2019.

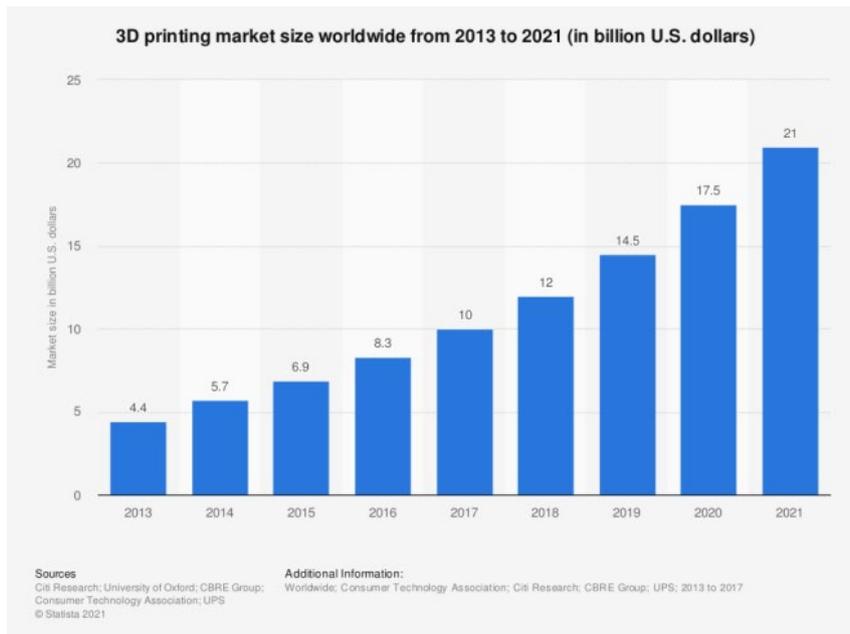
Nota-se um crescimento elevado tanto das vendas a cada ano quanto do número total de veículos sendo utilizados, indicando que a tendência é que carros com essa propulsão tenham maior parcela do mercado de transportes nos próximos anos. Por conseguinte, a maior variação das vendas ocorreu entre 2017 e 2018, revelando acréscimo ainda mais acentuado no período. Ademais, a população total de veículos elétricos aumentou milhares de vezes durante 2010 e 2018, confirmando a aceitação tanto da população quanto da indústria para esse tipo de produto.

A situação acima se repete em território brasileiro. Apesar de as vendas relativas ainda serem pequenas em comparação com alguns países, o setor de veículos elétricos no Brasil também está em crescimento. De acordo com a ABVE (Associação Brasileira de Veículos Elétricos), foram vendidos cerca de 20 mil veículos eletrificados no ano de 2020. Até agosto de 2021 já foram vendidos quase o mesmo número de unidades do ano anterior, registrando aproximadamente 70% a mais de emplacamentos que 2019 (MORENO, 2021).

### 3.2 – Mercado de Impressão 3D

Além dos meios de transporte elétricos que se fazem cada vez mais relevantes atualmente, algumas outras mudanças são experimentadas na indústria 4.0. Uma dessas transformações está relacionada aos métodos de fabricação, sendo que a impressão 3D é cada vez mais interessante para as indústrias e as empresas. O gráfico da figura 3, a seguir, demonstra a evolução de mercado mundial da impressão 3D:

Figura 3 – Tamanho do mercado de impressão 3D no mundo.



Fonte: Statista, 2021.

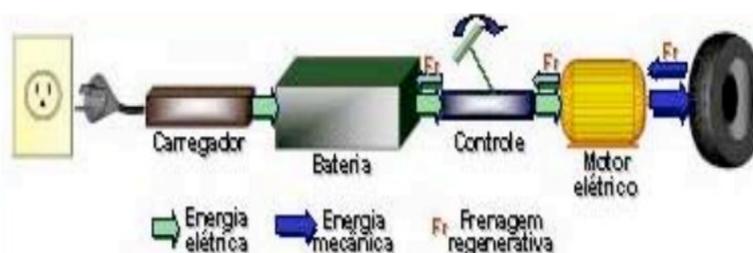
É possível notar que esse tipo de manufatura movimenta cada vez mais dinheiro, sendo que, para 2021, estima-se um mercado cerca de 5 vezes maior que o de 2013. Além disso, o maior crescimento absoluto ocorreu entre 2020 e 2021, demonstrando que a tendência é de maior elevação comparando-se aos anos anteriores, de modo que se reafirma a importância da manufatura aditiva para a indústria moderna.

### 3.3 – Especificações técnicas

O carro EV5010 é impulsionado por um motor elétrico de 10 cavalos e 72V, AC trifásico. Ele é alimentado por uma corrente alternada (AC) e em seu eixo rotacional há quatro cabos que fornecem energia em diferentes fases. Esse tipo de propulsor é mais simples de ser montado e instalado, ainda que seja potente e tenha uma boa vida útil. Ademais, a bateria que fornece energia para todo o sistema é de 72V e tem uma capacidade de 15 kWh.

O funcionamento de um veículo desse tipo é semelhante ao mostrado na imagem a seguir:

Figura 4 – Esquema de transformação de energia em um veículo eletrificado à bateria.



Fonte: Revista SODEBRAS, 2013.

No sistema supracitado, o veículo recebe energia a partir de um conjunto de baterias que são recarregadas pela rede elétrica. Elas podem ser de diversos tipos, sendo que algumas, como as de chumbo, são mais acessíveis, porém, mais pesadas, enquanto que as de lítio, que são mais leves, possuem custo de produção elevado. Em alguns veículos há, também, a frenagem regenerativa, que recarrega parte da bateria toda vez que o freio é acionado, convertendo energia mecânica em elétrica.

Em relação à eficiência de trabalho, carros desta classificação são 4 vezes mais eficientes que os movidos a motores de combustão interna convencionais, o que corresponde a 70%, aproximadamente (MABUB, 2013).

### 3.4 – Materiais de impressão

A manufatura aditiva pode ser executada a partir de vários materiais, como polímeros, metais e compósitos. No entanto, conforme as propriedades dos materiais alteram-se, e há maior dificuldade de manuseio, como dureza e tenacidade elevadas, e maleabilidade reduzida, os custos do processo de manufatura aumentam.

Nesse sentido, os materiais poliméricos, comuns no dia a dia pelo baixo custo e pela facilidade de serem moldados, tornam-se ótimas opções para constituir alguns componentes de carros elétricos, principalmente a carroceria. Desse modo, na tabela 2 estão enumerados alguns dos polímeros mais utilizados na indústria, os quais também são utilizados para impressão 3D.

Tabela 2 – Principais polímeros da indústria e da manufatura aditiva.

<b>Material</b>	<b>Características</b>
PLA (Ácido polilático)	Biodegradável, resistente mecanicamente e maleável.
ABS	Durável, resistente.
PC (Policarbonato)	Muito durável, mais difícil de manusear.

Conforme os materiais analisados, entende-se que o policarbonato e o ácido polilático são capazes de fornecer as propriedades mecânicas necessárias aos veículos, sendo que algumas peças que exijam maior resistência são feitas de PC, enquanto as outras partes são feitas de PLA.

No caso de polímeros, o método de impressão 3D mais comum empregado na indústria é o FDM (*Fused Deposition Modelling*), que consiste em adicionar camadas progressivas do material polimérico, desde a base do produto até o seu topo, criando camada por camada. Esse processo já é amplamente difundido no mercado e os custos são baixos, sendo que é possível fabricar peças complexas e funcionais (SHAHRUBUDIN, 2019).

## IV. CONCLUSÃO

As indústrias automobilísticas, assim como outras do setor de tecnologia, devem ser capazes de ofertar inovações pertinentes para acompanhar as necessidades da sociedade e a rapidez de suas mudanças. Logo, algumas técnicas de manufatura, como as presentes neste projeto, demonstram a utilidade e a urgência de alterar alguns processos produtivos tradicionais, desenvolvendo carros mais eficientes e sustentáveis.

A fabricação de carrocerias veiculares em impressoras 3D, nesse sentido, permite a flexibilização da criação e da produção de automóveis. Não obstante, os resultados da presente pesquisa indicam que há aceitação dos mercados para a inserção desse tipo de confecção, sendo que conforme a figura 3, a impressão 3D cresce e populariza-se sistematicamente.

Assim, esse processo de manufatura pode democratizar os meios de transporte elétricos, adequando-se às necessidades da mobilidade urbana contemporânea.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. **Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura**. XXIV SIMPEP. Bauru, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Dmontier-Jr/publication/321682376\\_PRINCIPAIS\\_INOVACOES\\_TECNOLOGICAS\\_DA\\_INDUSTRIA\\_40\\_E\\_SUAS\\_APLICACOES\\_E\\_IMPLICACOES\\_NA\\_MANUFATURA/links/5a2ab3a10f7e9b63e538ae47/PRINCIPAIS-INOVACOES-TECNOLOGICAS-DA-INDUSTRIA-40-E-SUAS-APLICACOES-E-IMPLICACOES-NA-MANUFATURA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dmontier-Jr/publication/321682376_PRINCIPAIS_INOVACOES_TECNOLOGICAS_DA_INDUSTRIA_40_E_SUAS_APLICACOES_E_IMPLICACOES_NA_MANUFATURA/links/5a2ab3a10f7e9b63e538ae47/PRINCIPAIS-INOVACOES-TECNOLOGICAS-DA-INDUSTRIA-40-E-SUAS-APLICACOES-E-IMPLICACOES-NA-MANUFATURA.pdf). Acesso em: 19 out. 2021.

LEDESMA, Leandro. **Melhoria contínua do processo de fabricação em uma indústria automotiva para minimização do desperdício aplicando o lean manufacturing**. UTFPR. Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24503>. Acesso em: 19 jun. 2021.

MABUB, Mônica Oliveira de Araújo et al. **Perspectivas dos veículos elétricos no mercado brasileiro**. Revista SODEBRAS, Volume 8, Nº 95, 2013. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N95.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

MANI, M.; LUONS, K. W.; GUPTA. S. K. **Sustainability Characterization for additive Manufacturing**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 119, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4487298/>. Acesso em: 29 out. 2021.

MORENO, Sayonara. **Venda de carros elétricos bate recorde no Brasil em 2021**. Rádio agência Nacional. Brasília, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2021-09/venda-de-carros-eletricos-bate-recorde-no-brasil-em-2021>. Acesso em: 19 out. 2021.

NOGUEIRA, Priscilla Calmon de Passos. **A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente**. UniBrasil. Curitiba, 2009. Disponível

em: <https://revistaeletronicardfd.unibrasil.com.br/index.php/rdfd/article/view/18>.  
Acesso em: 19 jun. 2021.

SILVA, Felipe Barcellos et al. **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2020. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_8/SEEG8\\_DOC\\_ANALITICO\\_SINTESE\\_1990-2019.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

SHAHRUBUDIN, N. et al. **An overview of 3D printing technology: technological, material, and applications**. SMPM. Johor, Malásia, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 31 out. 2021.

## VI. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo apoio à atividade de pesquisa através do PIBIC.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## **INFLUENCE OF PENTAERYTHRITOL ESTER ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ABS**

### **INFLUÊNCIA DO ÉSTER DE PENTAERITRITOL NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ABS**

Adiniele Martins de Faria<sup>1</sup>  
Carlos Henrique de Silva<sup>2</sup>  
Otavio Bianchi<sup>3</sup>

**Resumo – O objetivo do presente trabalho consiste em compreender a influência do éster de pentaeritritol, resina derivada da colofonia (breu), no comportamento mecânico do polímero ABS. Os materiais foram processados por mistura mecânica em extrusora de dupla rosca e injetados para confecção dos corpos de prova (ASTM D638). A amostra de ABS puro foi comparada as formulações contendo 5, 10 e 15% em massa de dois ésteres (R1 e R2). As caracterizações físico-mecânicas tração (ASTM D638) e dureza (ISO 868) foram utilizadas. As resinas ésteres R1 e R2 não modificam a estrutura química do ABS. A adição de R1 e R2 alteraram o comportamento mecânico, mostrando redução do módulo de elasticidade com o aumento da quantidade de resina incorporada. A dureza permaneceu praticamente constante com ambas as resinas.**

**Palavras-chave: ABS 1. Colofonia 2. Éster de Pentaeritritol 3.**

**Abstract - The influence of pentaerythritol ester, a resin derived from colophony (pine resin), on the mechanical behavior of ABS, was studied. The materials were processed via mechanical mixing in a twin-screw extruder and injected to make the specimens (ASTM D638). The pure ABS sample was compared to formulations containing 5, 10 and 15 wt % of resins R1 and R2. The physico-mechanical characterizations tensile (ASTM D638) and hardness (ISO 868) were used. Both the R1 and R2 esters do not modify the chemical structure of ABS. The addition of R1 and R2 changed the mechanical behavior, showing a reduction in the modulus of elasticity**

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Materiais (PPGEM/UTFPR). Contato: adiniely@hotmail.com;

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Professor Orientador, Dr. Do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Materiais (PPGEM/UTFPR). Contato: carlos@utfpr.edu.br;

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Coorientador, Professor Dr. do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M/UFRGS); Contato: otavio.bianchi@ufrgs.br.

*with the increase in the amount of incorporated resin. Hardness remained practically constant with both resins.*

**Keywords:** *ABS 1. colophony 2. Pentaerythritol ester 3.*

## I. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos e misturas poliméricas (blendas) têm ganhado destaque no desenvolvimento de produtos por serem capazes de combinar diferentes materiais a fim de se obter melhorias nas propriedades mecânicas, químicas, térmicas e outras, a um custo de desenvolvimento menor quando comparado à síntese de um novo polímero. Algumas características dos polímeros como baixo peso, menor custo de produção, resistência a corrosão entre outras, possibilitam e viabilizam a utilização desses materiais em diversas aplicações substituindo os materiais metálicos em componentes estruturais, mancais e outras aplicações (FRIEDRICH, 2018).

O copolímero de acrilonitrila butadieno e estireno ABS é um terpolímero amorfo muito utilizado em diferentes setores industriais. Ele é usado em indústrias automotivas (interiores de veículos, tampas de motor) e de eletrodomésticos, geralmente para essas aplicações a relação resistência mecânica x peso é um dos parâmetros fundamentais para escolha do material empregado (CANEVAROLO JR, 2010).

Uma das metodologias comumente empregadas aos polímeros para melhoria de propriedades é a incorporação de elementos aditivos ao polímero puro (RABELLO; PAOLI, 2000). Dentre muitos aditivos de fontes renováveis, a utilização de resinas derivadas da colofonia (breu), ésteres provenientes da reação de esterificação, se apresentam como uma alternativa no desenvolvimento de novos materiais. Elas são compatíveis com diferentes tipos de polímeros, como por exemplo, o ABS, a borracha de estireno butadieno (SBR), o copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA), o polipropileno (PP), o poliácido láctico (PLA) e outros (AMORIM, 2013).

Dentre as vantagens de se utilizar os ésteres como elemento aditivo para obtenção de um novo material, cabe citar: a) o preço comercial do ABS e das resinas aplicadas são próximas, portanto, a resina apresenta mesmo valor comercial do polímero com possibilidade -a ser analisada no presente estudo- de conceder propriedade melhoradas pelo mesmo custo de matéria prima (FRIEDRICH, 2018); b) por apresentar mais de 85% de fonte renovável, o éster de pentaeritritol aplicado ao ABS apresenta-se como um material que fomenta o conceito *green chemistry* buscando eliminar ou reduzir o uso e geração de substâncias nocivas à saúde e ao ambiente. Dentre as categorias envolvendo ações compatíveis à química verde destaca-se o uso de fontes renováveis e/ou recicláveis (LENARDÃO *et al.* 2003). Por esses motivos, as resinas derivadas da colofonia (breu) estão sendo investigadas como elemento aditivo em polímeros

Mediante a incorporação dos ésteres de pentaeritritol no ABS busca-se investigar a influência de dois derivados da colofonia no comportamento mecânico do polímero. O efeito do tipo do éster e a quantidade incorporada foram avaliados utilizando propriedades físico-mecânicas e espectroscopia na região do infravermelho (FTIR).

## II. METODOLOGIA

### 2.1 – Materiais

O ABS comercial utilizado para estudo foi o TAIRILAC AE8000 fabricado pela *Formosa Chemical & Fibre Corporation*. Duas resinas ésteres de pentaeritritol foram utilizadas: Resina R1 (ponto de amolecimento de 98°C e índice ácido de 15 mg KOH/g) e Resina R2 (ponto de amolecimento de 135°C e índice ácido de 45 mg KOH/g). As resinas R1 e R2 constituem-se em um éster sintetizado a partir da reação do ácido abiético da colofônia e o poli álcool pentaeritritol e se diferenciam entre si pela incorporação do elemento anidrido maleico na resina R2. Ambas as resinas foram fornecidas pela empresa Florpinus Indústria Química Ltda.

### 2.2 – Processamento das misturas

As quantidades de 5, 10 e 15% das resinas R1 e R2 foram adicionadas ao ABS. As amostras foram processadas em extrusora dupla rosca co-rotante, COR 25-44-1200 (MH), L/D 44, D = 25 mm, com rampa de temperatura de 95 a 230 °C a 334 rpm. Em todas as amostras foi adicionado 1% de estearato de cálcio. A Tabela 1, apresenta a codificação das amostras produzidas. Posteriormente, as amostras foram moldadas por injeção em uma injetora modelo Arburg 420 C para confecção dos corpos de prova (ASTM D 638), utilizando rampa de temperatura de 210 – 230 °C, pressão de injeção de 850 - 650 Bar e tempo de 5 s.

Tabela 1 – Amostras processadas

Amostra	Descritivo
AR1-5	ABS + 5 % R1
AR1-10	ABS + 10 % R1
AR1-15	ABS + 15 % R1
AR2-5	ABS + 5 % R2
AR2-10	ABS + 10 % R2
AR2-15	ABS + 15 % R2

Fonte: Autores, 2021.

### 2.3 – Caracterização química: FTIR

As resinas ésteres R1 e R2 foram caracterizadas através da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. O equipamento utilizado para obter os espectros foi o modelo MB3000 da ABB, dentro da faixa de varredura de 4000 - 600  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 16 varreduras. O equipamento para análise foi cedido pelo laboratório de Controle e Qualidade da Florpinus Industria Química.

Os ensaios das formulações ABS+%Resina e polímero puro foram conduzidos por FTIR modelo 640-IR da Varian, dentro da faixa de varredura de 4000 - 600  $\text{cm}^{-1}$ , utilizando ART, disponível no Laboratório Multiusuário de Análises Químicas (LAMAQ) da UTFPR.

#### 2.4 – Caracterização mecânica: Ensaio de Tração e Dureza

As propriedades de tração das formulações e do polímero puro foram avaliadas em uma máquina de ensaio de tração do tipo Emic DL2000 à temperatura ambiente, de acordo com a norma ASTM D 638. Os ensaios foram realizados com uma célula de carga Trd 24 e uma velocidade de teste de 50 mm/min. As amostras de cada formulação e do polímero puro foram ensaiadas cinco vezes.

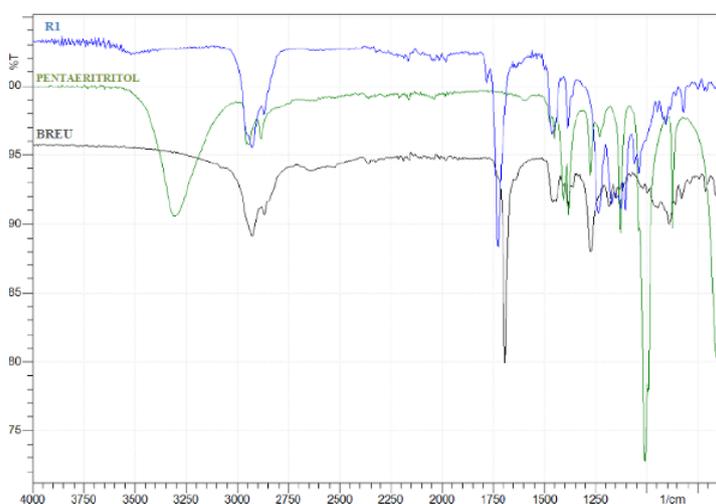
A dureza Shore D das amostras mostradas na Tabela 1 e do polímero puro foram medidas em um corpo de prova de 3 mm de espessura utilizando um durômetro modelo MTK-1041 da Metrotokyo conforme norma ISO 868. As medições ocorreram em ambiente a 24,3°C e umidade relativa de 57%. A média de 12 medições para cada corpo de prova foi relatado como o valor de dureza.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 – Caracterização química: FTIR

A Figura 1 apresenta os espectros de FTIR da colofonia (breu), do pentaeritritol utilizado para reação de esterificação e da resina éster R1. As mesmas absorções foram observadas nos estudos de Xu *et al.* (2019). Segundo os autores, o desaparecimento quase completo do pico característicos dos grupos -OH entre 3330  $\text{cm}^{-1}$  e 3670  $\text{cm}^{-1}$  no éster indica que uma reação de esterificação ocorreu e que o éster foi sintetizado com sucesso.

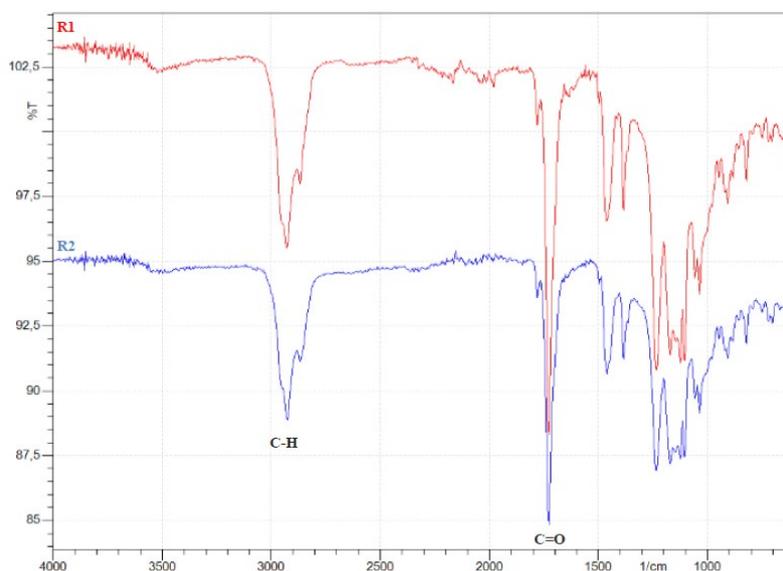
Figura 1 – FTIR: Breu x Pentaeritritol x R1



Fonte: Autores, 2021.

Comparando os espectros das resinas ésteres R1 e R2 (Vide Figura 2) é possível perceber similaridade: foi identificado a absorção C-H entre 3000 – 2850  $\text{cm}^{-1}$  e a absorção C=O entre 1800 – 1700  $\text{cm}^{-1}$ .

Figura 2 – FTIR: Breu x Pentaeritritol x R1



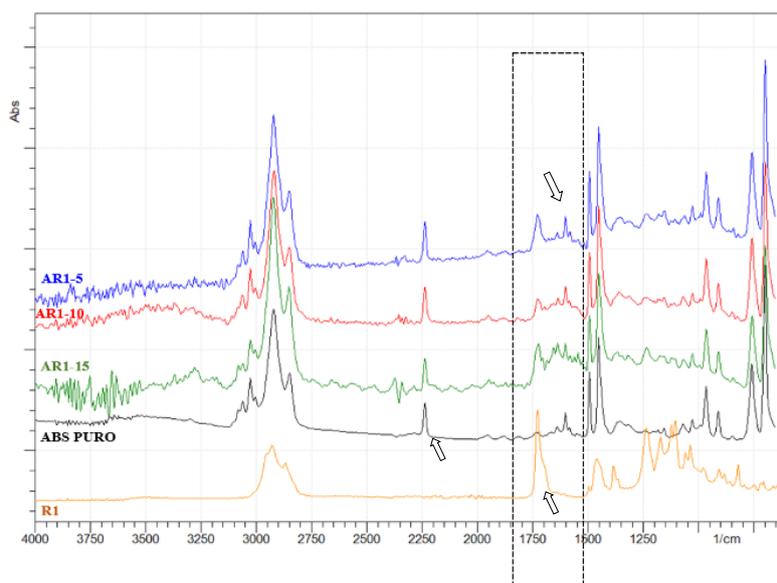
Fonte: Autores, 2021.

Não foi possível identificar alterações na resina R2 pela adição do anidrido maleico, isto é, devido a sobreposição de bandas. O anidrido maleico, através da reação de Diels-Alder, forma um monoácido em triácido, permitindo a criação de estruturas ramificadas com maior peso molecular (MOTA, 2016).

As Figura 3 e 4, apresentam os espectros de FTIR do ABS puro comparando-o às formulações contendo concentrações de 5, 10 e 15% de resina R1 e R2, respectivamente.

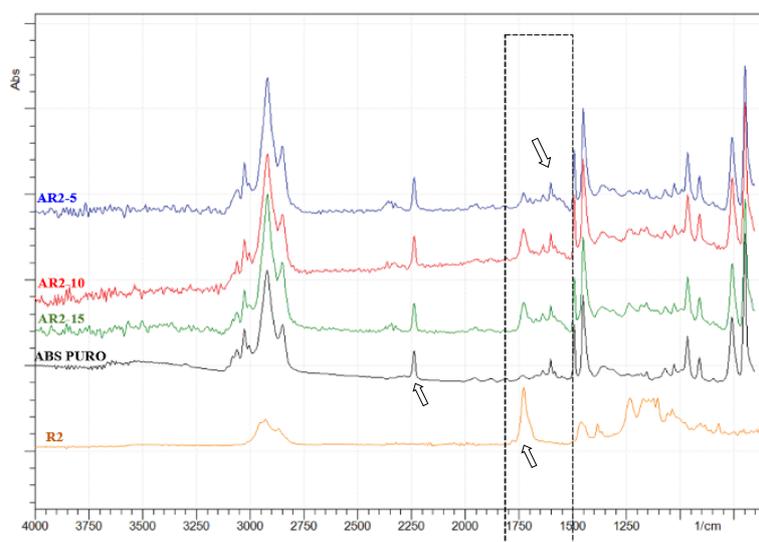
Em concordância com os espectros observados por Saviello *et al.* (2014), o ABS apresentou absorções do grupo nitrila CN ( $\sim 2250 \text{ cm}^{-1}$ ), grupo carbonila ( $\sim 1740 \text{ cm}^{-1}$ ), C=C em vinil butadieno ( $\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ ), anel aromático em estireno ( $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ ), e outras. Para essas absorções, as formulações produzidas não sofreram modificações com a incorporação da resina, independente da concentração ou da resina incorporada.

Figura 3 – FTIR: Formulações (ABS + R1) x ABS puro x R1



Fonte: Autores, 2021.

Figura 4 – FTIR: Formulações (ABS + R2) x ABS puro x R2



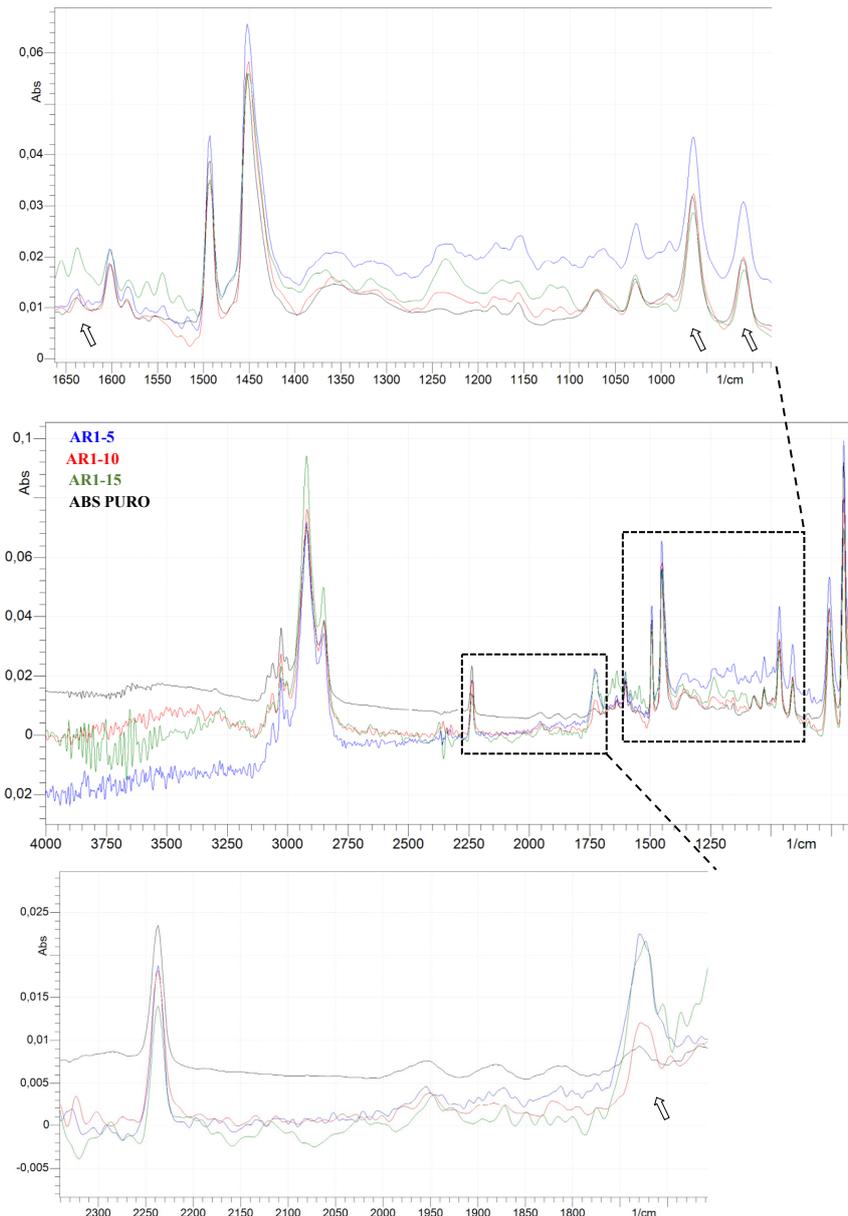
Fonte: Autores, 2021.

Comparando os espectros, para ambas as situações, é observado que a absorção do grupo carboxila dos ésteres ( $\sim 1750 \text{ cm}^{-1}$ ) também foi identificado nas formulações que contêm resinas incorporadas. Para o polímero puro, a absorção nessa região é expressivamente menos intensa.

A ausência da ligação OH entre  $3400 - 3000 \text{ cm}^{-1}$  das formulações produzidas infere que as amostras, apesar de não passarem por secagem pré-processamento, não apresentam umidade que possam interferir no comportamento qualitativo dos materiais analisados.

A Figura 5, apresenta os detalhes do espectro FTIR do ABS puro comparado as formulações produzidas com a resina R1. De acordo com a figura, nota-se que as formulações apresentaram maiores índices de carbonilas, adicionalmente, é possível observar uma elevação nos picos correspondentes às absorções da fase butadieno próximo a 910, 967 e 1640  $\text{cm}^{-1}$  comparado ao polímero puro. As mesmas características foram observadas para as formulações contendo a resina R2. (SAVIELLO *et al.* 2014) (SANCHEZ *et al.* 1999)

Figura 5 – FTIR: Formulações (ABS + R1) x ABS puro



Fonte: Autores, 2021.

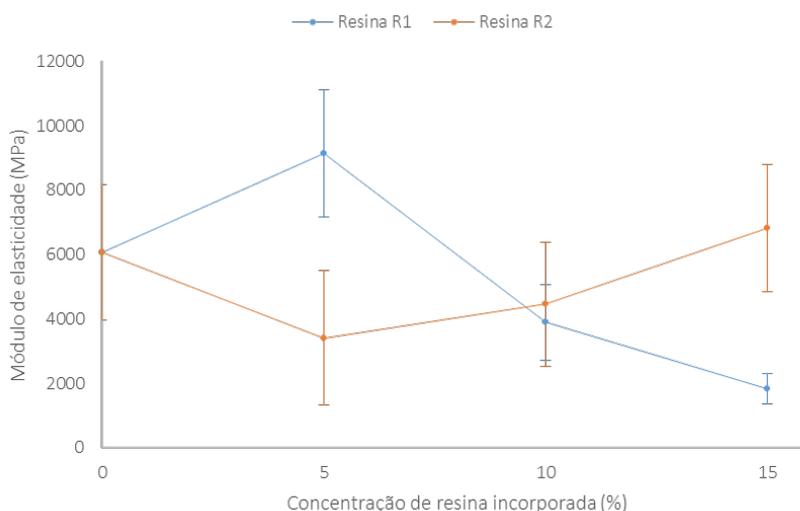
### 3.2 – Caracterização mecânica: Ensaio de Tração e Dureza

As propriedades de tração dos materiais foram avaliadas, e foi observado que o ABS puro tem uma resistência à tração de 42,16 MPa e módulo de elasticidade de 6063 MPa. Os valores obtidos no ensaio estão em concordância com os resultados informados pelo fornecedor em certificado de análise e em literatura específica (EBEWELE, 2000). As Figuras 6, 7 e 8, apresentam a variação do módulo de elasticidade, da resistência à tração e da deformação na ruptura, em termos de porcentagem e o tipo de resina incorporada.

A incorporação da resina R1 em concentração de até 5% foi capaz de aumentar o módulo de elasticidade tornando o material mais rígido, a resistência a tração não sofreu alterações significativas para essa condição. Em concentrações maiores, houve uma redução da rigidez e da resistência a tração em relação a matriz pura.

Para a resina R2, foi identificado uma redução de 35% no módulo de elasticidade em relação ao ABS puro para a menor concentração de resina incorporada. Para a formulação contendo 15% da resina R2 não foi observado alterações significativas da rigidez comparado ao polímero puro. Um efeito de saturação é observado a partir de teores de 5% da resina R2, onde o maior resultado de resistência a tração foi alcançado.

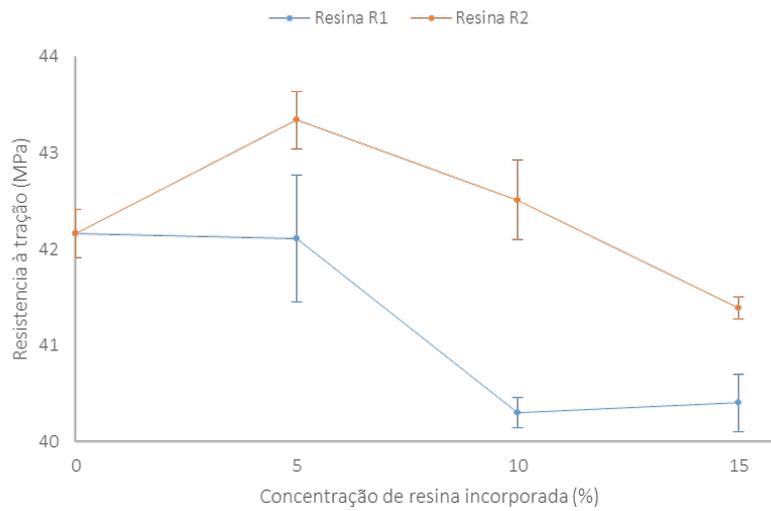
Figura 5 – Módulo de elasticidade



Fonte: Autores, 2021.

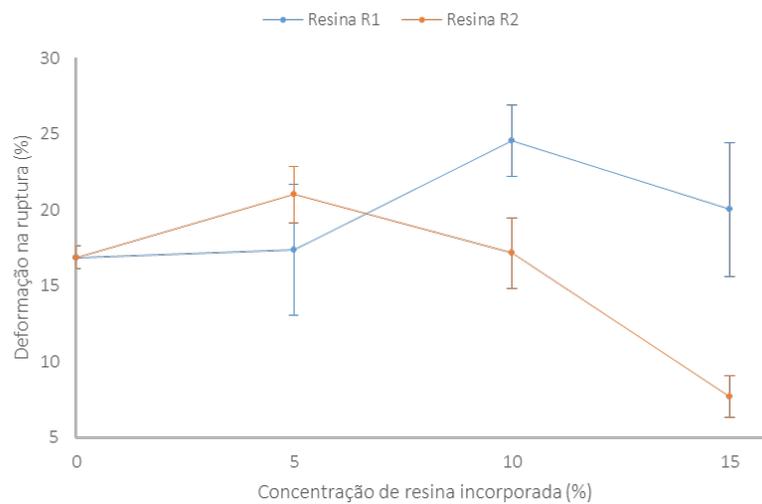
A deformação na ruptura aumentou com a incorporação da resina R1, independente da concentração, sugerindo dessa forma um efeito plastificante do segundo material a matriz polimérica, proporcionando maior ductilidade ao material. Para a resina R2, o efeito foi contrário, há uma elevação da do alongamento na ruptura para concentração de 5%, seguida de queda para concentrações maiores. A elevação da resistência a tração, em concentrações específicas com a incorporação da resina R2, pode sugerir um efeito compatibilizante da resina à matriz, podendo ser justificada pela presença do anidrido maleico em sua composição.

Figura 6 – Resistencia à tração



Fonte: Autores, 2021.

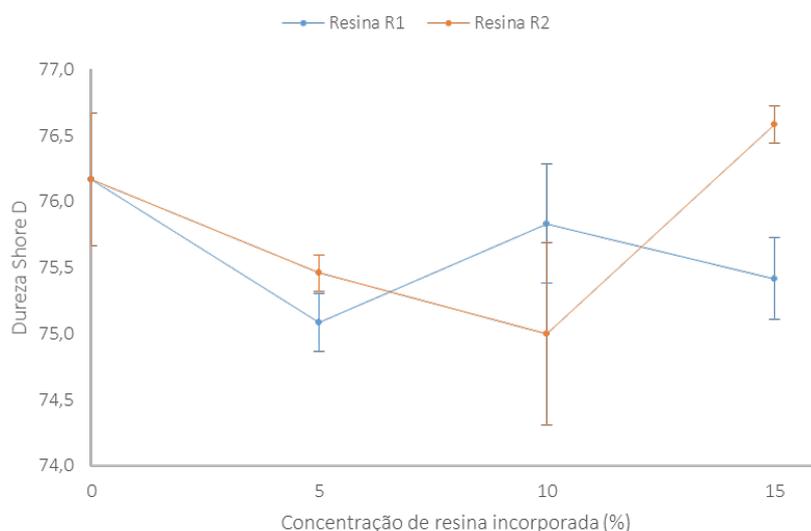
Figura 7 – Deformação na ruptura



Fonte: Autores, 2021.

A Figura 8, apresenta os resultados para o ensaio de dureza Shore D no polímero puro e das formulações produzidas. Segundo resultados, a dureza do ABS puro não sofreu ou sofreu variação pouco significativa com a incorporação das resinas R1 e R2, independente do teor adicionado à matriz.

Figura 8 – Dureza Shore D.



Fonte: Autores, 2021.

Efeitos de plastificação de resinas derivadas do breu foram relatadas por Aldas *et al.* (2019) com a incorporação de ésteres de pentaeritritol à matriz do biopolímero *Mater-Bi* e Ramirez *et al.* (2020) com a incorporação do breu e de um éster de pentaeritritol à matriz do biopolímero PLA. Da mesma forma, segundo estes autores a dureza do polímero puro, apresentou baixa variação e em alguns casos, resultados estatisticamente iguais.

#### IV. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou identificar a influência do éster de pentaeritritol, resina derivada da colofonia, no comportamento mecânico do ABS puro. Duas resinas ésteres foram incorporadas a matriz polimérica em concentrações de 5, 10 e 15%. Os materiais formulados foram analisados comparativamente ao ABS puro. Para a caracterização química não foram identificadas diferenças significativas das misturas com a incorporação do segundo elemento. Absorções de FTIR foram similares entre ABS puro e as misturas.

A resistência a tração aumentou com a incorporação da resina R2 em concentrações de até 10%, com relação ao polímero puro, o que pode estar associado a formação de uma rede de ligações físicas, enquanto para as formulações com a resina R1 percebeu-se um decréscimo para todos os teores adicionados à matriz. A deformação na ruptura aumentou com a incorporação da resina R1, independente da concentração, sugerindo dessa forma um efeito lubrificante ou plastificante.

Estudos complementares serão efetuados com objetivo de melhor qualificar as misturas processadas. Dessa maneira busca-se, de forma indireta, ampliar o mercado das resinas ésteres, fomentando a sua aplicação como elemento de desempenho ao polímero puro.

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDAS, M.; FERRI, J.; MARTINEZ, J.; SAMPER, M.; ARRIETA, M. **Effect of pine resin derivatives on the structural, thermal, and mechanical properties of Mater-Bi type bioplastic.** Journal of Applied polymers science, 137,2019

AMORIM, William Silva. **Estudo das características térmicas e mecânicas de formulações de adesivos PSA HOT MELT contendo variações de borrachas SBC e resinas taquificantes.** 2013. 65 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

ASTM D638-03. **Standard Test Method for Tensile Properties of. Plastics.** ASTM American Society for Testing and Materials. 2003.

CANEVAROLO JR, S. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 3ª Edição. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

EBEWELE, R. O. **Polymer Science and Technology.** CRC Press, 2000.

FRIEDRICH, K. **Polymer composites for tribological applications.** Advanced Industrial and Engineering Polymer Research,1, p 3- 39, 2018.

ISO 868. **Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness).** ISO International Organization for Standardization. 2003.

LENARDÃO, E. FREITAG, R. DABDOUBGREEN, M. BATISTA, A. SILVEIRA, C. **“Green Chemistry” – Os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa.** Quim. Nova, Vol. 26, No. 1, 123-129, 2003.

MOTA, R F G. **Aumento do tempo de vida de um éster de colofônia** 2016. 134 f. Dissertação - (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Técnico Lisboa. 2016.

RABELLO, M; PAOLI, M. **Aditivção de termoplásticos.** São Paulo: Artliber Editora, 2000.

RAMIREZ, H.; ALDAS, M.; FERRI, J.; MARTINEZ, J.; SAMPER, M. **Modification of poly (lactic acid) through the incorporation of gum rosin and gum rosin derivative: Mechanical performance and hydrophobicity.** Journal of Applied polymers science, 2020.

SANCHEZ, E.; FERREIRA, M.; FELISBERTI, M.; **Avaliação da Degradação Térmica e Fotooxidativa do ABS Automotivo.** Polímeros: Ciência e Tecnologia. 1999.

SAVIELLO, D.; POUYET, E.; TONIOLO, L.; COTTE, M.; NEVIN, A.; **Synchrotron-based FTIR microspectroscopy for the mapping of photo-oxidation and additives in acrylonitrile–butadiene–styrene model samples and historical objects.** Analytica Chimica Acta. v. 843, 2014, pg. 59-72.

XU, Z.; LOU, W.; ZHAO, G.; ZHANG, M.; HAO, J.; WANG, X. **Pentaerythritol rosin ester as an environmentally friendly multifunctional additive in vegetable oil-based lubricant.** Tribology International 135 (2019) 213–218.

#### VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas Florpinus Indústria Química Ltda (Campo Largo/ PR) pelo fornecimento das resinas estudadas e disponibilidade do laboratório para caracterização das resinas, Colorfix Itamaster Indústria de Masterbatches Ltda (Colombo/ PR) e Mantoflex Indústria de Plásticos Ltda (Caxias do Sul/ RS) pelo processamento das amostras e ao Laboratório Multiusuário de Análises Químicas (LAMAQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela caracterização química das amostras.

#### VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***THE CURRENT PANORAMA OF WIND TURBINES AVAILABLE ON THE MARKET***

### ***O PANORAMA ATUAL DOS AEROGERADORES DISPONÍVEIS NO MERCADO***

Natasha Martins Rodrigues de Jesus<sup>1</sup>  
Rafael Soares Souza<sup>2</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>3</sup>  
Thais Santos Castro<sup>4</sup>

***Resumo – O crescente desenvolvimento do uso de energia eólica tem despertado grande interesse. Diante desse cenário, o objetivo deste artigo foi analisar o panorama atual de turbinas eólicas e realizar pesquisas científicas anteriores a fim de fundamentar a divulgação do uso do agregado de energias renováveis, o aerogerador. O presente artigo além de abordar a viabilidade do uso das turbinas eólicas, abordou pesquisas sobre os modelos disponíveis e o funcionamento básico.***

***Palavras-chave: Energia Eólica. Aerogerador. Pás Eólicas.***

***Abstract – The increasing development of the use of wind energy has aroused great interest. Given this scenario, the objective of this article was to analyze the current panorama of wind turbines and to carry out previous scientific research in order to support the dissemination of the use of the renewable energy, the wind turbine. This article, in addition to addressing the using wind turbines, addressed research on the available models and the basic operation.***

***Keywords: Wind Energy. Wind Turbine. Wind Blades.***

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [natasha.jesus@unesp.com](mailto:natasha.jesus@unesp.com);

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [soares.souza@unesp.br](mailto:soares.souza@unesp.br);

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [teofilo.souza@unesp.br](mailto:teofilo.souza@unesp.br);

<sup>4</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: [thais.castro@unesp.br](mailto:thais.castro@unesp.br).

## I. INTRODUÇÃO

Os primeiros relatos na história ocorrem em torno de 2800 a.C. na utilização dos ventos para benefício dos seres humanos. Esse recurso natural que auxiliou a humanidade evoluir em diversas habilidades como na navegação, moagem de grãos, pesca, bombeamento de água através dos moinhos e a evolução não parou. Em julho de 1887, o engenheiro eletricitista Escocês James Blyth foi considerado como o criador do primeiro aerogerador, utilizando a energia eólica para energizar sua residência com corrente contínua (BRYAN et al., 2021).

Segundo Martins (2021), a turbina eólica foi projetada para produzir energia elétrica através da captação da energia cinética do vento. Este processo, baseia-se em duas transformações de energia. A energia cinética em energia mecânica, que por sua vez é transformada em uma fonte de energia. Esta energia pode ser utilizada para a geração de eletricidade ou para bombeamento d'água. Sabe-se que o fator energético é um dos pontos mais importantes para o desenvolvimento da humanidade, considerando a vulnerabilidade dos atuais mecanismos de suprimento de energia que também é conhecida

Diante do crescimento mundial do consumo de energia elétrica, a busca por fontes de energias renováveis e limpas tornou-se o objetivo fundamental para atender as necessidades da humanidade, em especial quando se pensa nas futuras gerações. Segundo Santos (2018) há diversos componentes que levam a afirmação de que é necessário investir mais nas energias renováveis, são eles: a possibilidade de usar uma energia mais barata e a preservação do meio ambiente, dentre outros. Portanto, a energia eólica é uma das opções e atualmente é a responsável por aumentar o fornecimento a novas fontes de energia. Como consequência dessa produção constata-se o baixo custo em comparação com outras fontes de energia renováveis (HATJE, 2018).

## II. METODOLOGIA

Este artigo trata da análise do cenário de turbinas eólicas visando ampliar a fundamentação teórica sobre o tema proposto. Para a realização deste estudo foram consultados artigos técnicos relacionados ao tema proposto, trabalhos de conclusões de curso, dissertações de mestrado, tese de doutorado, livros, revistas técnicas científicas e as plataformas eletrônicas: Google Acadêmico, *Scopus* e *Web of Science*. Para atingir o objetivo deste artigo, foi realizada uma triagem detalhada nos artigos, teses, dissertações e livros, sendo utilizados com referência aqueles que possuíam conceitos, quantitativos relevantes com intuito de demonstrar a importância da utilização de Aerogerador para fontes de energias renováveis.

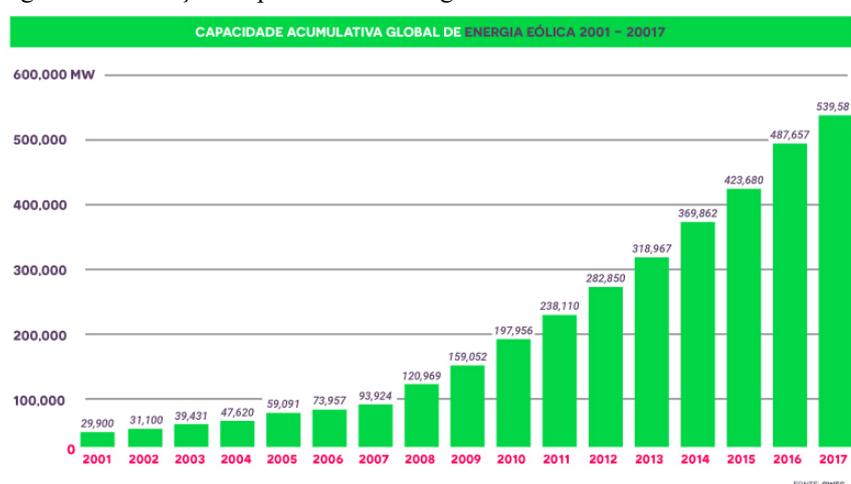
## III. RESULTADOS

Este trabalho tem por finalidade apresentar em forma de estudo, algumas características sobre a geração da energia eólica na atualidade e o panorama no Brasil, incluindo informações sobre alguns equipamentos e funcionalidade para a geração da mesma. Apresentar os principais tipos de sistemas onde é utilizada a energia eólica. Também analisar e descrever os principais modelos de aerogeradores disponíveis no mercado.

### 3.1 A partir do ano 2000

Atualmente, os incentivos com investimentos alcançam mais de 30 mil aerogeradores fornecendo uma produção mundial de energia elétrica de origem eólica. A perspectiva era de chegar em 2020 com uma produção mundial de 12% de fornecimento energia eólica, o que corresponde a 12000 GW (ANEEL, 2018). Conforme informado no site (ENERGIA EÓLICA, 2018) o grande aumento de energias alternativas com o uso em aerogeradores, como apresentado na Figura 1, apresenta o crescimento da capacidade global de energia eólica. Entre os anos de 2001 e 2017 houve um aumento de 18,05 vezes na produção mundial passando de 29,9 GW para 539,6 GW do uso da energia eólica. Com isso, é notável que utilizar a geração de energia renovável é uma alternativa para uma produção energética independente de combustíveis fósseis.

Figura 1 – Evolução do potencial de energia eólica instalado no mundo de 2001 a 2017.



Fonte: ENERGIA EÓLICA, 2018.

### 3.2 Tipos de turbinas eólicas

As turbinas eólicas podem ser divididas em dois grandes grupos de acordo com a orientação do eixo de rotação do rotor em vertical ou horizontal. As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns comparadas às turbinas eólicas de eixo vertical, uma vez que estas apresentam alguns aspectos negativos, como a baixa taxa de velocidade de ponta (menor rendimento), a incapacidade de iniciar o movimento autonomamente e dificuldade de controlar a velocidade do rotor (MARTINS, 2021)

Para as turbinas de eixo horizontal de três pás, suas principais vantagens inserem-se na rentabilidade ao nível da potência captada pela turbina, bem como as solicitações a que estas estruturas estão sujeitas, revelando um comportamento mais estável comparativamente com as turbinas de eixo vertical (PIMENTA, 2020).

Para captar a energia eólica do vento, as turbinas eólicas encontram-se munidas de um rotor giratório constituído por um certo número de pás, que devido às suas propriedades aerodinâmicas, motivam a geração de forças de sustentação (*lift*) ao longo do seu comprimento, levando a um torque aerodinâmico sobre o eixo do rotor (MARTINS, 2021). Como a energia gerada é proporcional ao torque e à velocidade angular, uma caixa de velocidades (*gearbox*) é utilizada entre o eixo de baixa rotação

(solidário com o rotor) e o eixo de alta velocidade para multiplicar as rotações, permitindo, assim, transmitir e controlar a energia mecânica que chega ao gerador.

### 3.3 No Brasil

Conforme cita CRISÓSTOMO (2017) no Brasil só houve incentivos governamentais após a crise energética de 2001, onde certificou-se a necessidade do uso de fontes de energia renováveis, destacando-se a eólica. Foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica – Pró eólica e no ano de 2002, para fortalecer as ideias de fornecimento de energia limpa, foi inaugurado o PROINFA (Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia).

O setor energético eólico brasileiro é dividido em três categorias conforme sua situação no fornecimento de energia elétrica:

- Operação: são parques eólicos aptos para produzir eletricidade, mas ainda não são contratos para o fornecimento de energia para o sistema elétrico de potência.
- Construção: são classificados os setores em que ainda estão em fase de planejamento e construção.
- Contratado: são os setores responsáveis pela geração eólica fornecida ao sistema elétrico de potência.

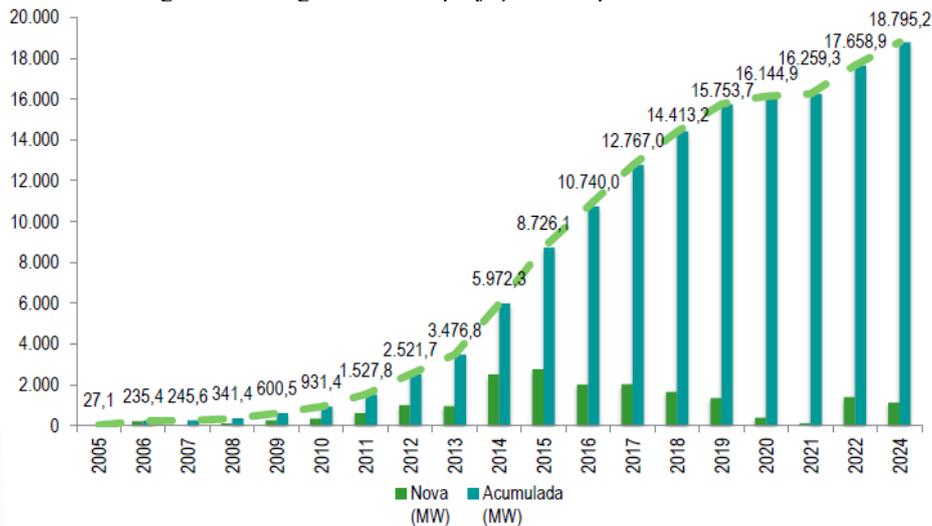
Já em 2018, o crescimento da energia eólica no Brasil atendeu e surpreendeu as previsões de um mercado promissor, o investimento para futuro chega a R\$60 bilhões. O Brasil operava com 520 parques eólicos, aproximadamente 6.600 aerogeradores e fornecendo 13 GW de potência instalada, o suficiente para atender 67 milhões de pessoas ou equivalente a 22 milhões de residência (SOL CENTRAL, 2018). Em 2021 segundo Aneel (2021a), o Brasil opera com 726 parques eólicos, 8.500 aerogeradores e fornecendo 17 GW de potência instalada atendendo a 87,63 milhões de pessoas.

Estima-se que o crescimento da geração de energia eólica brasileira terá um crescimento, conforme mostra na Figura 2. A expectativa para instalação em 2024 chegará a 18,8 GW em todo território brasileiro. Os dados apresentados referenciam os setores contratados e em operação (ABEEOLICA, 2018).

No cenário de 2018 do parque eólico brasileiro atingiu o patamar com potência instalada de 14 GW, que corresponde à capacidade instalada da hidrelétrica de Itaipu e representa aproximadamente 14% da potência fornecida para o Sistema Interligado Nacional - SIN (AGENCIA BRASIL, 2018).

No ranking mundial, o Brasil está entre os sete países que mais dispõe de potência eólica no mundo (GWEC, 2021). Esse potencial energético é devido à capacidade de geração dos parques e complexos eólicos distribuídos no território brasileiro, sendo que o nordeste do país é a região de maior disponibilidade no fornecimento de potência eólica, tendo como principais estados o Rio Grande do Norte e a Bahia (VITAL; PIN; NUNES, 2020)

Figura 2 – Imagem ilustra a projeção da capacidade até 2024.



Fonte: ABEEOLICA, 2018.

No Brasil das fontes renováveis existentes, a eólica apresenta um grande crescimento, aumentando cerca de 40,6% entre janeiro e agosto do ano de 2021 de acordo com o site Aneel (2021b), sendo que no nordeste brasileiro a mesma fonte é responsável por 87% de todo o setor elétrico da região com cerca de 620 parques eólicos distribuídos.

A energia eólica se enquadra como uma opção de energia alternativa e apresenta vantagens quando comparadas com outras fontes de geração elétrica:

- Não são baseadas em combustíveis fósseis;
- Não produzem resíduos químicos altamente tóxicos;
- Não emitem gases poluentes;
- Sua fonte de abastecimento é inesgotável, proveniente dos ventos;
- É uma ciência nova e vem crescendo cada vez mais, contribuindo para o desenvolvimento setor energético de potência;
- É uma geração de energia com incentivos fiscais;
- É considerada uma fonte de energia barata;

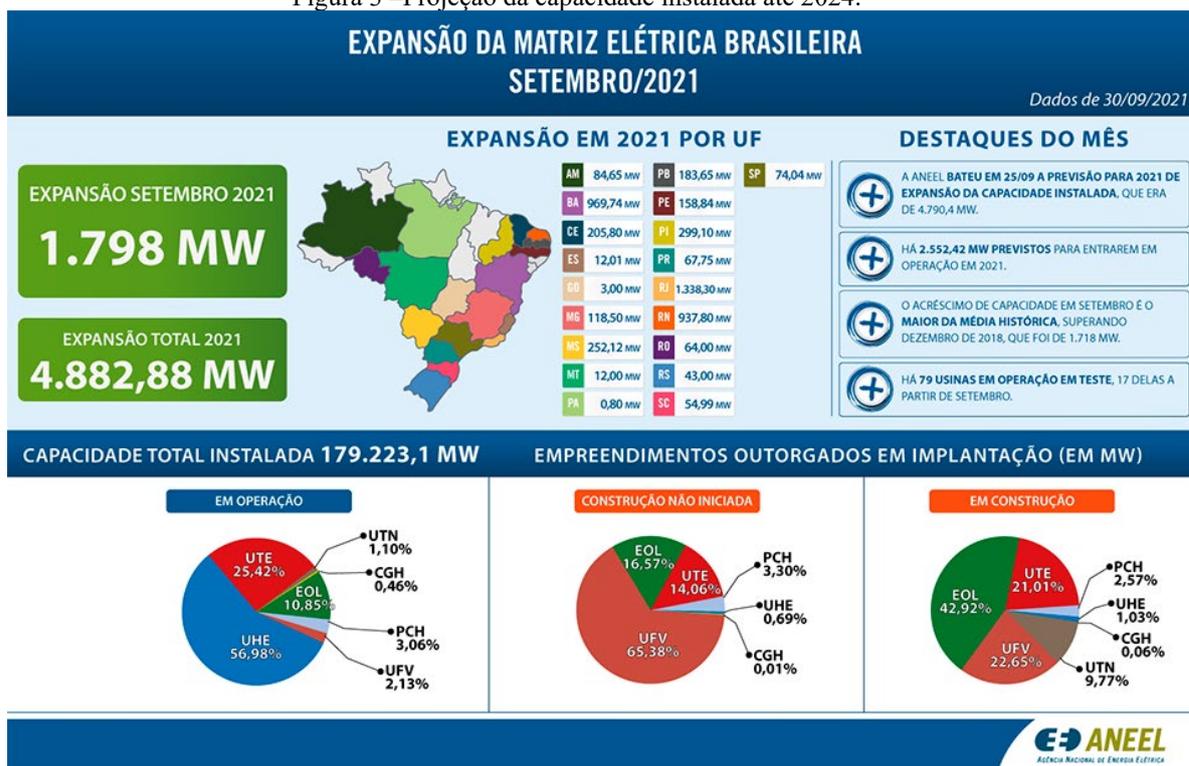
As desvantagens apresentadas pela energia eólica são:

- Impacto sonoro devido a vários aerogeradores trabalharem próximos uns dos outros;
- Impacto visual;
- Impacto sobre as aves no local;
- É dependente da ação natural do vento;
- É necessário um enorme território para a construção de parques eólicos;

Assim, as desvantagens da geração eólica são menos expressivas se comparados aos impactos positivos. Um dos desafios para os novos avanços tecnológicos é minimizar os impactos ambientais e problemáticos que surgem durante a produção energética (SANTOS, 2018).

Em 2021 é possível notar que o Brasil tem investido muito na expansão da matriz elétrica, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Projeção da capacidade instalada até 2024.



Fonte: (ANEEL, 2021c)

Verifica-se que a Bahia, em 2021, teve um maior aumento na disponibilidade de potência eólica do Brasil ultrapassando o Rio Grande do Norte. Com expansão de 407,23 MW, em julho de 2021, totalizando a capacidade de instalada de 1787 MW próximo do previsto somente para 2022, totalizando esse crescimento no ano de 2021 em 4882,8 MW conforme a Figura 3.

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentados os principais modelos de aerogeradores presentes no mercado brasileiro e no mundo. A análise do panorama em 2021 e aplicação da energia eólica tem tido uma crescente aplicação, principalmente quando se trata de reduzir o uso de energias que afetam o meio ambiente e alteram o fator climático. A utilização dos aerogeradores em grandes escalas a nível de potência fornecida para cidades e estados, mostra a preocupação e importância da preservação do ecossistema e da utilização de eletricidade mais baratas, que a sociedade busca. Conclui-se que há uma grande variedade de aerogeradores no mercado atual, que busca atender as diversas demandas encontradas.

## V. REFERÊNCIAS

ABEEOLICA. **Associação brasileira de energia eólica – Números ABEEólica/outubro/2018**. 2018, disponível em:<<http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acessado em 08 de novembro de 2018.

AGENCIA BRASIL, 2018 - **Produção de energia eólica no país atinge marca de 14 gigawatts**. Disponível em <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-11/producao-de-energia-eolica-no-pais-atinge-marca-de-14-giga-watts>. Acessado em 08 de novembro de 2018.

ANEEL. Download dos atlas 2ª edição – 6. **Energia Eólica**. Agência nacional de elétrica, Brasil, ANP. 2018. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>>. Acessado em 05 de outubro de 2021.

ANEEL. **Usinas eólicas correspondem a 83% do acréscimo de potência no primeiro semestre de 2021-** Sala de Imprensa - ANEEL. 2021a. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/usinas-eolicas-correspondem-a-83-do-acrescimo-de-potencia-no-primeiro-semester-re-de-021/656877?inheritRedirect=false&redirect=http:%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de->](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/usinas-eolicas-correspondem-a-83-do-acrescimo-de-potencia-no-primeiro-semester-re-de-021/656877?inheritRedirect=false&redirect=http:%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de->)>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ANEEL. **Capacidade instalada em 2021 supera 1 gigawatt; eólicas são o destaque pelo quarto mês seguido - Sala de Imprensa - ANEEL**. 2021b. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/capacidade-instalada-em-2021-supera-1-gigawatt-eolicas-sao-o-destaque-pelo-quarto-mes-seguido/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_zXQREz8EVIZ6%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D3](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/capacidade-instalada-em-2021-supera-1-gigawatt-eolicas-sao-o-destaque-pelo-quarto-mes-seguido/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3)>. Acesso em: 18 nov. 2021.

ANEEL. **ANEEL bate meta de expansão da matriz elétrica em 2021, três meses antes do previsto - Sala de Imprensa - ANEEL**. 2021c. Disponível em:<[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-em-2021-tres-meses-antes-do-previsto/656877?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-em-2021-tres-meses-antes-do-previsto/656877?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 11 nov. 2021.

BRYAN, T. M.; ENGLEZOU, A.; GUPTA, J.; BACCHETTI, S.; REDDEL, R. R. **Telomere elongation in immortal human cells without detectable telomerase activity**. EMBO Journal, v. 14, n. 17, p. 4240–4248, Disponível em:<<http://dspace.doctum.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1896/ANALISEDEAEROGERADORESDESISTEMASDEENERGIAEOLICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

CRISÓSTOMO, D. C. C. (2017) **Simulador de controle de potência, energia e conexão à rede de aerogeradores**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em sistemas de comunicação e automação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.

ENERGIA EÓLICA, 2018. **Realize o sonho de muitos e viva de brisa! Energia Eólica: bons ventos levando você. Como funciona?.** Disponível em: <<https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogador-de-eixo-horizontal/>>. Acessado em novembro de 2018.

GWEC. **Eólica alcança recorde em 2020, mas mundo ainda precisa dobrar capacidade para atingir metas climáticas.** 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/eolica-alcanca-recorde-em-2020-mas-mundo-ainda-precisa-dobrar-capacidade-para-atingir-metas-climaticas/>>. Acesso em: 5 out. 2021.

HATJE, A. E. **Desenvolvimento de molde para pás de turbina eólica de pequenas proporções.** 2018.

MARTINS, A. P. **Influência da modelação numérica na avaliação da fadiga: Especialização em Estruturas.** 2021. Disponível em: <<https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/135237/2/485640.pdf>>.

PIMENTA, F. **Definition of monitoring strategies for floating offshore wind turbines using advanced numerical modeling.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

SANTOS, A. U. **Análise de aerogeradores de sistemas de energia eólica.** 2018. Disponível em: <<http://dspace.doctum.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/1896>>. Acessado em 07 de outubro de 2018.

SOL CENTRAL, 2018. **Mercado de Energia eólica no Brasil reúne especialistas e autoridades para debater cenários de crescimento do setor.** Disponível em: <<http://www.solcentral.com.br/news/mercado-de-energia-eolica-no-brasil-reune-especialistas-e-autoridades-para-debater-cenarios-de-crescimento-do-setor/#more-9422>>. Acessado em 07 de outubro de 2018.

VITAL, R. M.; PIN, A.; NUNES, M. A. C. **Análise do uso e potencial da produção de energia solar, eólica e de biomassa no estado do Maranhão.** Revista SODEBRAS, v. 15, n. 171, p. 6–11, 2020. Disponível em: <<http://www.sodebras.com.br/edicoes/N146.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2021.

TEMPO, 2018. **Por que o Nordeste é um polo de energia eólica?** – Disponível em: <<https://www.tempo.com/noticias/ciencia/por-que-o-nordeste-e-um-polo-de-energia-eolica.html>>. Acessado em 17 de julho de 2021.

## VIII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.

## ***SOLAR TRACKERS: A LITERATURE REVIEW***

### ***RASTREADORES SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

Rafael Soares Souza<sup>1</sup>  
Natasha Martins Rodrigues de Jesus<sup>2</sup>  
Teófilo Miguel de Souza<sup>3</sup>  
Thais Santos Castro<sup>4</sup>

***Resumo – A energia solar atualmente é considerada uma fonte de energia renovável e abundante com elevado potencial de desenvolvimento. Com o intuito de se ter uma geração de energia mais eficiente, o uso de rastreadores solares permite um melhor aproveitamento da irradiação solar ao longo do dia. Com esse pensamento, o presente trabalho busca apresentar um estudo sobre os tipos de rastreadores solares e seus aspectos.***

***Palavras-chave: Energia Solar, Rastreamento Solar, Sustentabilidade.***

***Abstract – Solar energy is currently considered a clean and abundant energy source with high potential for development. In order to have a more efficient energy generation, the use of solar trackers allows a better use of solar radiation throughout the day. With this in mind, this paper seeks to present a study on the types of solar trackers and their aspects.***

***Keywords: Solar Energy, Solar Tracking, Sustainability.***

## **I. INTRODUÇÃO**

Um dos fatores fundamentais para a satisfação da maioria das necessidades do homem, é a utilização da energia. Além disto, ela está presente em diversas atividades realizadas pela humanidade. Tendo isso em mente, diversos avanços tecnológicos e conhecimentos desenvolvidos foram voltados para a obtenção e administração de meios de conversão de energia para atender melhor tais necessidades (SILVA, 2006).

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: soares.souza@gmail.com;

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: natasha.jesus@unesp.com;

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: teofilo.souza@unesp.br;

<sup>4</sup> Universidade Estadual Paulista – Unesp. *Campus* Guaratinguetá. Contato: thais.castro@unesp.br.

A junção de dados e a sua análise indicaram que as energias renováveis (solar, eólica, etc.), são excelentes fontes para a diminuição de impactos negativos ao meio ambiente, pois ao se fazer uso delas o abuso do *habitat* e a emissão de gases diminui (SOUZA et al., 2020).

A energia solar térmica na atualidade, é destinada a menos de 1% da demanda do calor mundial. Sua maior utilização está no aquecimento doméstico de água. Sendo assim, em escala mundial, a energia solar térmica uma simplória participação. Em nível nacional, o Brasil possui apenas 2% da capacidade instalada em relação ao mundo, no entanto, em 2014 já apresentou aumento no setor industrial, pois cerca de 17% de novas instalações surgiram (IEA, 2017).

O maior consumo de energia da indústria é na forma de calor. Sendo este consumo equivalente a mais de um terço de energia consumida no mundo. Com isso, um fator preocupante para o setor, são as emissões causadas pela queima de combustíveis. Como uma solução atraente surge a questão de uso de energia renovável. Na atualidade há estudos que viabilizam o uso de sistemas de aquecimento solar para diferentes setores industriais. Mas é claro que é necessário, uma avaliação sobre as características dos setores e seus respectivos processos (CASCAES, 2019).

A energia solar pode ser utilizada em diversas áreas, atendendo desde aquecimento de tubulações até sua função principal de geração de energia elétrica. Suas características principais, são dela ser renovável e inesgotável, o que a torna atraente para o mercado energético. No entanto, algo que provoca grande discussão neste setor, é a sua forma de captação, pois essa energia em específico depende das condições meteorológicas, e de outros fatores, tais como a otimização da forma de sua captação. Com isso em mente, uma forma que permite o aumento do rendimento desta captação, é a movimentação da estrutura captadora conforme exposição a luz solar, que por sua vez é conhecido como rastreador solar. Este mecanismo pode ter diversos modelos, todos com o intuito de posicionar o captador perpendicularmente aos raios solares incidentes, (PRADO *et al.*, 2015).

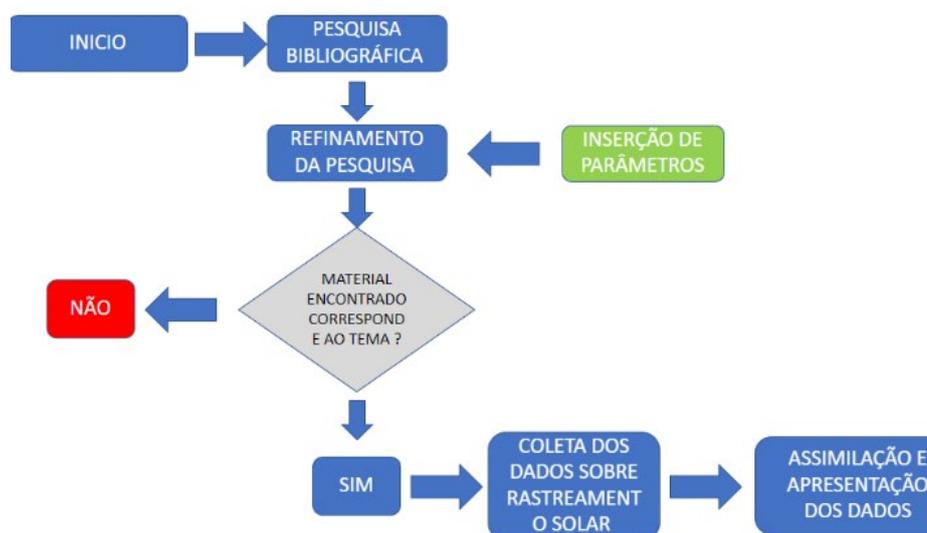
## II. METODOLOGIA

O presente artigo se trata de uma revisão bibliográfica, que por sua vez tem o objetivo de aumentar a fundamentação teórica do tema de rastreadores solares. Diversas fontes foram consultadas para construção do mesmo. As principais bases de dados estudadas foram da Scopus e do Google Acadêmico. Foi realizada uma triagem nos bancos de dados no intuito de afunilar a pesquisa ao tema proposto e com isso assimilar as informações consistentes sobre o tema.

## III. DESENVOLVIMENTO

Para a criação do artigo foi realizado pesquisas no Google acadêmico e Scopus. Nesta foi adotado um método de pesquisa que está explicita na Figura 1, que representa o fluxograma da pesquisa.

Figura 1. Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor (2021)

Com o método definido, a execução da pesquisa foi realizada. Primeiramente foi realizada a busca na base de dados Scopus. Para o refinamento da pesquisa, foi implementado palavras chaves que a delimitassem especificamente ao tema pretendido. Na Tabela 1, está apresentada a pesquisa obtida nesta base.

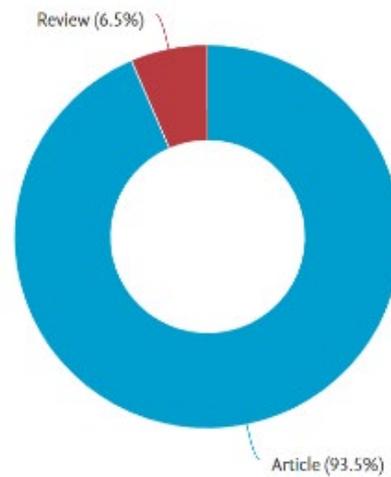
Tabela 1. Resultados obtidos na base Scopus.

Item	Base Scopus	Ano	Palavras chaves	Área
1	6962	Todos os anos	Solar Tracker	Todas
2	4167	2017 a 2020	Solar Tracker	Todas
3	3637	2017 a 2020	Solar Tracker	Energia e Engenharia
4	688	2017 a 2020	Solar Tracker	Energia
5	31	2017 a 2020	Solar Tracker ; Solar Energy	Energia

Fonte: Autor (2021)

Baseado na Tabela 1 e com o devido refinamento foi possível chegar especificamente a 31 artigos que estão relacionados diretamente ao tema de rastreamento solar. Além disso, como a plataforma Scopus possui ferramentas de análises de pesquisas, foi possível identificar os tipos de arquivos encontrados, que correspondem a revisões (2) e artigos (29) e estão apresentados na Figura 2.

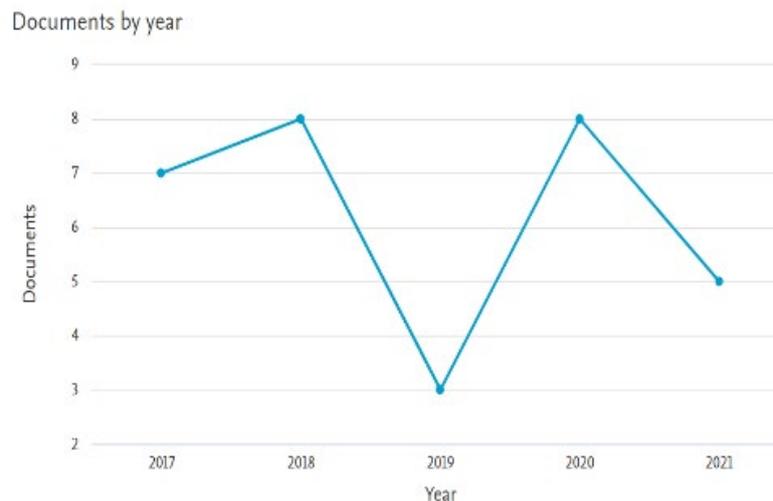
Figura 2. Tipos de arquivos encontrados.



Fonte: Scopus (2021)

Outra importante análise foi a de publicações por ano sobre o tema, em que os anos de 2018 e 2020 tiveram mais publicações, ambas com 8. Esta informação é ilustrada pela Figura 3.

Figura 3. Trabalhos publicados por ano.



Fonte: Scopus (2021).

Com a pesquisa na base de dados Scopus realizada, para se ter uma alternativa de dados, a busca por material foi realizada também no Google Acadêmico. A pesquisa nesta base de dados foi simplória devido ferramenta possuir poucas operações. Ela seguiu os parâmetros de palavras-chaves de *solar tracker types* e delimitado ao intervalo de anos

entre 2017 e 2021. Isso gerou 123 Trabalhos para serem analisados e refinados de acordo com o método proposto.

#### IV. RESULTADOS

Após o refinamento dos dados obtidos, e busca por trabalhos compatíveis com o tema proposto, chegou-se a alguns trabalhos que se destacam como fundamentais para a realização da pesquisa. A Tabela 2 representa os títulos, autores e o ano de publicação deles.

Tabela 2. Trabalhos mais relevantes

Autores	Título	Ano publicação
Prado et al.;	Estado Da Arte Em Mecanismos De Rastreamento Solar	2015
Hafez et al.;	. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review	2018
Mousazadeh et al.;	A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output	2009
Sumathi et al.;	Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade	2017
Da rocha et al.;	CLASSIFICAÇÃO DE RASTREADORES SOLARES: UMA BREVE REVISÃO	2018

Fonte: Autor (2021)

##### 4.1 Tipos de rastreadores solares

A seguir será apresentado os principais tipos, suas vantagens e desvantagens de rastreadores solares que foram encontradas na pesquisa científica. Prado (2015), realizou um estudo sobre os tipos de rastreadores em relação aos seus eixos, segundo ele há dois principais tipos. Primeiramente a de um eixo, em que basicamente são aqueles sistemas que possuem sua capacidade limitada a apenas uma faixa de abrangência, com relação a luz solar. Na Figura 4, é demonstrado um modelo básico deste sistema.

Este sistema tem como principal vantagem sua facilidade em relação a estruturação de seu movimento, pois seu funcionamento é realizado a uma velocidade constante, entretanto, sua principal desvantagem é o pouco ganho energético de sua coleta, isso ocorre porque este sistema possui a inclinação fixa.

Os sistemas que têm a capacidade de seguir o movimento solar em duas faixas de abrangências, devido as suas variações nos ângulos, são os sistemas de dois eixos (Prado, 2015). Na Figura 5, é possível uma ilustração deste sistema.

Figura 4. Modelo de rastreamento solar de apenas um eixo



Fonte: Prado *et al.* (2015)

Figura 5. Modelo de rastreamento solar de dois eixos.



Fonte: Prado *et al.*,(2015)

Basicamente, suas vantagens e desvantagens são a oposição do sistema de eixo, sendo elas, a principal desvantagem a dificuldade de movimentação e a necessidade de constante alteração do ângulo para o seu funcionamento pleno, e como principal vantagem o alto ganho da energia, pois com a possibilidade de inclinação, a extensidade da irradiação solar acaba sendo maior.

Hafez *et al.*, (2018) fala sobre outra classificação dos rastreadores, começando pelos rastreadores passivos. Estes por sua vez possuem construção simples, não fazem uso de uma fonte de alimentação e nem de um sistema de controle. Porém, apresentam baixa eficiência, são limitados a dispositivos com mecanismos de um eixo e apresentam um funcionamento integral em regiões com temperaturas demasiadas baixas. A figura 8 ilustra um modelo que utiliza fluídos

Figura 6. Rastreador solar passivo que utiliza fluídos



Fonte: Passos (2016).

O próximo modelo explicado no trabalho de Hafez *et al.*, (2018) foi o de classificação ativo. Ele apresenta maior eficiência, opera sob qualquer condição meteorológica e pode ser utilizado em ambos os sistemas, tanto de 1 eixo como o de 2 eixos. Suas desvantagens consistem na necessidade de um controle externo, maior complexidade e precisa ter uma alimentação elétrica. Na figura 7 podemos ver um modelo deste tipo.

Figura 7. Rastreador solar ativo utilizando controlador.



Fonte: Passos (2016).

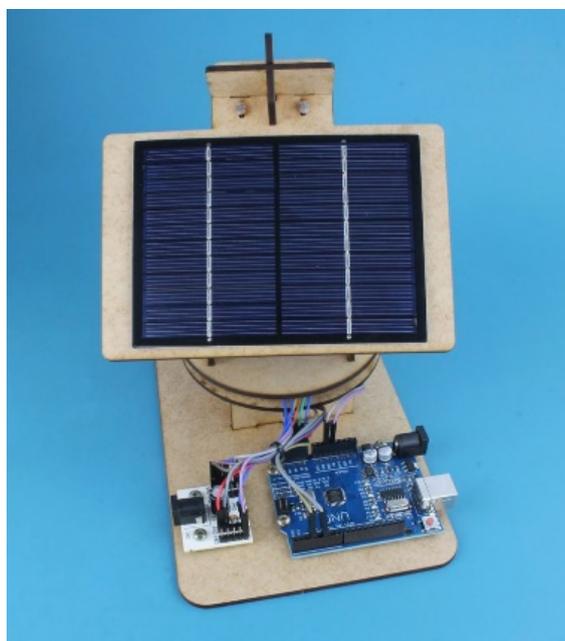
Queiroz *et al.*, (2018) apresenta outras subclassificações de rastreadores solares. A com controle em malha fechada, permite a possibilidade corrigir erro e compensar perturbações, o que resulta uma orientação precisa. Porém possui uma complexidade maior de sistema de controle e conseqüentemente seus custos são elevados.

O com controle em malha aberta, tem uma certa simplicidade de construção e um custo menor. Mas é necessário um estudo preliminar específico para que se possa realizar a calibração de seus parâmetros.

Um sistema que adota um rastreamento baseado em data e tempo. Este modelo apresenta construção simples. Seu sistema de controle não sofre perturbações, porém tem eficiência baixa e necessita estudo prévio para pleno funcionamento.

Um outro sistema que se baseia em sensores, apresenta maior eficiência, rastreamento preciso. No entanto, seu algoritmo é complexo e necessita de uma modelagem precisa dos sensores. Na Figura 8 é possível ver um protótipo de rastreador solar fazer uso de um controlador e um sensor LDR.

Figura 8. Rastreador Solar com Arduino e Sensor LDR.



Fonte: Straub (2018).

Há também um sistema de rastreador híbrido, que utiliza sensores e faz uso da data e tempo para ajustar seu posicionamento. Este sistema consegue ter os ganhos de ambos os sistemas, porém se torna complexo, com um alto custo e para que seu funcionamento seja executado de forma correta, tem como pré-requisito um estudo especializado.

#### *4.2 Ganho Energético*

Sumathi (2017) traz em sua conclusão de seu estudo realizado referente a rastreadores solares, que o ganho aproximado da utilização destes mecanismos em

estruturas captadoras de energia fotovoltaica é de 30% em relação a uma estrutura de captação que esteja imóvel.

Abdelghani (2018) ressalta a mesma informação a respeito do ganho do uso de rastreadores solares, que é estimado que seja 30% em relação a sistemas que não tenham movimentação.

E segundo Abdunnabi (2018) que ainda destacando o ganho resultante de 30 % do uso de rastreadores solares, traz também a importante informação que este ganho é levando em consideração a utilização de motores, controladores, fonte energética externa e quaisquer outros itens de instalação.

## V. CONCLUSÃO

Após a realização desta pesquisa pode se chegar à conclusão da imensa variedade de rastreadores solares. O que deixa implícito também que há possibilidades de outros desenvolvimentos em cima do tema. Este é um tema atual e que vem ganhando forças no mercado atual por se tratar de uma energia inesgotável, o que torna ainda mais atraentes as variações deste sistema. É importante ressaltar que existe tal variedade, para atender as diversas demandas.

Por último, chega se a conclusão principal deste estudo, que é de que o uso de rastreadores solares em estruturas captadoras de energia fotovoltaica apresenta uma porcentagem de ganho energético considerável em relação a estruturas que não possuam graus de liberdades, que estejam estáticas. Sendo assim, mesmo utilizando itens adicionais na estrutura, que a tornam mais caras ou que necessitam de algo a mais para que seu funcionamento seja pleno, a sua utilização é viável;

## VI. REFERÊNCIAS

ABDELGHANI, M. A. I. KHALFALLAOUI, D.S. VERNIÉRES, L.H. LEVENEUR, S. Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system. **Renewable Energy**, Volume 119, p. 79 – 94, 2018.

ABDUNNABI, M. ABUSALAMA, A. ALGAMIL, M. ALMONTASER, M. Flat Plate based- Solar System with a tracking system. **Solar Energy and Sustainable Development**, Volume 7, 2018.

CASCAES, B. P. “Avaliação de oportunidades do uso de energia solar térmica em aplicações industriais no Brasil,” **Time**, vol. 6, no. 3, p. 198, 2019.

QUEIROZ, J. et al. **Classificação de rastreadores solares: uma breve revisão**. [s.l: s.n.], 2018.

IEA, International Energy Agency. Renewable's information: Overview 2017. **IEA Statistics**, p. 8, 2017.

HAFEZ, A. Z.; YOUSEF, A. M.; HARAG, N. M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types– A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2018

IEA, International Energy Agency. Renewables information: Overview 2017. **IEA Statistics**, p. 8, 2017.

SILVA, N. F. **Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica**, Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

SOUZA, G. B. DE et al. Energias renováveis e as alternativas das matrizes energéticas sustentáveis. **In: As múltiplas visões do meio ambiente e os impactos ambientais**. [s.l.] Uniedusul, 2020. p. 7–23.

STRAUB, Matheus. **Rastreador Solar com Arduino e LDR** - Blog UsinaInfo. <https://www.usinainfo.com.br/blog/rastreador-solar-com-arduino-um-seguidor-solar-atraves-de-ldr/> (accessed Nov. 17, 2021).

SUMATHI, Vijayan. JAYAPRAKASH, R. BAKSHI, Abhinav. AKELLA, P. K. Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 74, p. 130 – 138, 2017.

PASSOS, F. **Seguidor Solar – Parte 2: Classificação e Tipos – Microgeração Fotovoltaica**. <https://microgeracaoofv.wordpress.com/2016/10/17/seguidor-solar-parte-2-tipos/> (accessed Nov. 18, 2021).

PRADO, T. F. ULHOA, J. J. R. DAMASCENO, and L. G. M. VIEIRA. **Estado Da Arte Em Mecanismos De Rastreamento Solar**. no. March, pp. 8333–8340, 2015.

## VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.