



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

RAFAEL SOARES DE SOUZA

**Abordagem científica de dispositivos para rastreamento solar passivo com dilatação
térmica metálica**

Guaratinguetá - SP
2023

Rafael Soares de Souza

Abordagem científica de dispositivos para rastreamento solar passivo com dilatação térmica metálica

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-orientadora: Prof.^a.Dra. Thais Santos Castro

Guaratinguetá - SP
2023

S729a	Souza, Rafael Soares de Abordagem científica de dispositivos para rastreamento solar passivo com dilatação térmica metálica / Rafael Soares de Souza - Guaratinguetá, 2023. 82 f : il. Bibliografia: f. 64-68 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza Coorientadora: Prof^a. Dr^a Thais Santos Castro 1. Energia solar. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Radiação solar. 4. Rastreamento (Engenharia). I. Título CDU 620.91(043)
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa está diretamente ligada a cinco itens dos objetivos de desenvolvimentos sustentáveis, que são a saúde de qualidade, energias renováveis, inovação e infraestrutura, cidades e comunidades sustentáveis e consumo responsável. Ela oferece pesquisas inovadoras no setor de energias renováveis, especificamente com painéis solares.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research is directly linked to five items of the sustainable development objectives, which are quality health, renewable energy, innovation and infrastructure, sustainable cities and communities and responsible consumption. She offers innovative research in the renewable energy sector, specifically with solar panels.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

RAFAEL SOARES DE SOUZA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA”

PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Documento assinado digitalmente
MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Data: 14/11/2023 09:31:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente
TEOFILO MIGUEL DE SOUZA
Data: 01/11/2023 13:42:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Teófilo
Miguel de Souza
Orientador /
UNESP/FEG participou
por videoconferência



Documento assinado digitalmente
NESTOR PROENZA PEREZ
Data: 09/11/2023 16:02:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Nestor
Proenza Pérez
UNESP/FEG
participou por
videoconferência



Documento assinado digitalmente
OSIRIS CANGILIERI JÚNIOR
Data: 09/11/2023 13:27:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Osiris
Cangiglieri Júnior
PUC/PR

participou por
videoconferência
Novembro de 2023

DADOS CURRICULARES

RAFAEL SOARES DE SOUZA

NASCIMENTO: 20.09.1995 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO: José Rodolfo de Souza
Regina Soares de Souza

2021/2023 - Curso de Pós-Graduação em Engenharia – Área de Mecânica
Mestrado – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

2023/2027 - Curso de Graduação em Engenharia dos Materiais –
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

2019/2020 - Curso de Graduação
Tecnologia Projetos e Estruturas Aeronáuticas – Fatec São José dos Campos – Jessen Vidal

2016/2018 - Curso de Graduação
Tecnologia Automação e Manufatura Digital – Fatec São José dos Campos – Jessen Vidal

2010/2013 – Curso de Nível Técnico
Técnico em Informática – ECOMPO

Dedico primeiramente a Deus, ao qual me capacitou e me deu forças para perseverar na construção da pesquisa. Dedico a minha família que sempre me deu apoio e suporte para que eu pudesse continuar a estudar. Dedico a todos que fizeram parte deste projeto de forma direta e indireta.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus primeiramente por ter me capacitado e me guiado neste processo da pesquisa.

Agradecer a minha família por sempre acreditar em mim e fornecer apoio durante o tempo necessário.

Agradecer a minha noiva Natasha por me apoiar imensamente e me auxiliar em todos os momentos de dificuldades.

Agradecer aos técnicos da Unesp–Feg, Rodolfo dos Santos e Antônio Augusto Moretti Rizzato por terem me auxiliado imensamente na construção dos projetos e nas modificações necessárias realizadas.

Agradecer aos funcionários da biblioteca por todo auxílio e disponibilidade oferecidos ao longo da pesquisa.

Agradecer a empresa Fabaraço pela doação de um fio de bronze em formato helicoidal, que foi essencial para a minha pesquisa.

Agradecer aos funcionários da pós-graduação que sempre sanaram dúvidas e ofereceram apoio.

Agradecer aos professores doutores Osiris Canciglieri Júnior e Nestor Proenza Pérez pelas importantes orientações em minha banca de defesa final e agradecer as professoras doutoras Isabel Cristina de Barros Trannin e Raphaela Carvalho Machado por terem participado e auxiliado na banca de qualificação desta dissertação.

E por último agradecer por último aos meus professores orientadores Teófilo e Thais por me ajudarem no desenvolvimento desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – número do processo 155837/2021-4.

RESUMO

As energias renováveis vêm se tornando cada dia mais relevantes em nossa sociedade devido a importância dada a preservação ambiental do planeta. Uma das principais energias alternativas é a energia solar, onde está atuando por meio de painéis fotovoltaicos. Com o avanço das pesquisas nesta área, foram desenvolvidos meios de movimentar este painel ao longo do dia para aumentar a eficiência energética e assim o ganho de energia solar. Com esta perspectiva, este estudo teve como objetivo desenvolver uma pesquisa para propor um rastreador solar de um grau de liberdade de caráter inovador, onde seu funcionamento seria por meio da dilatação linear de um material metálico. Inicialmente foram expostas amostras de aço, alumínio e latão em cor natural e pintado de preto fosco para verificar se haveria diferença de variação de temperatura. Com isso foram adotadas três metodologias, o primeiro com uma espiral metálica, o segundo com um fio de bronze helicoidal e por último foram realizados experimentos com uma lâmina bimetálica sob a forma de termômetro. Após os experimentos realizados as três metodologias notou-se que a espiral metálica não se deslocou pois sofreu um evento de enrugamento nas voltas, não permitindo a dilatação na última espira, o fio de bronze helicoidal teve sua dilatação no sentido radial e não no longitudinal como esperado, assim não houve deslocamento em sua última volta e com o experimento com a lâmina bimetálica sob forma de termômetro, foi possível visualizar e relacionar a variação de temperatura com ângulos trigonométricos, sendo o maior valor obtido de 92 graus, onde a lâmina estava exposta com uma chapa de latão de cor natural e dentro do vidro comum. Por último, foi realizado também um experimento para verificar se esta dilatação poderia deslocar uma massa de 1,8 gramas, e teve-se um resultado positivo, ou seja, o termômetro especificado deslocou a massa estipulada. Ao fim, concluiu-se que a proposta é de fato inovadora, de acordo com a bibliografia pesquisada e com as variações obtidas e a massa deslocada seria possível destinar o mecanismo para painéis solares por meio de ajustes de escala.

PALAVRAS CHAVES: Energia solar; rastreador solar; materiais metálicos; painéis fotovoltaicos.

ABSTRACT

Renewable energies are becoming more relevant every day in our society due to the importance given to environmental preservation of the planet. One of the main alternative energies is solar energy, which operates through photovoltaic panels. With the advancement of research in the area, means of moving this panel throughout the day were developed to increase energy efficiency and consequently gain solar energy. With this perspective, this study aimed to develop research to propose a solar tracker with an innovative degree of freedom, where its operation would be through the linear expansion of a metallic material. Initially, samples of steel, aluminum and brass were displayed in natural color and painted matte black to check whether there was a difference in temperature variation. With this, three methodologies were adopted, the first with a metallic spiral, the second with a helical bronze wire and finally experiments were carried out with a bimetallic blade in the form of thermometer. After the experiments carried out using the three methodologies, it was noted that the metallic spiral did not move as it suffered a wrinkling event in the turns, not allowing expansion during the last spiral, the helical bronze wire had its expansion in the radial direction and not in the longitudinal direction as expected, so there was no displacement in its last turn and with the experiment with the bimetallic blade in the form of a thermometer, it was possible to visualize and relate the temperature variation with trigonometric angles, with the highest value obtained being 92 degrees, where the blade was exposed with a natural colored brass plate and inside common glass. Finally, an experiment was also carried out to check whether this expansion could displace a mass of 1.8 grams, and there was a positive result, that is, the specified table displaced the stipulated mass. In the end, we concluded that the proposal is indeed innovative, according to the bibliography researched and with the variations obtained and the displaced mass, it would be possible to allocate the mechanism to solar panels through scale adjustments.

KEYWORDS: Solar energy; solar tracker; metal materials; photovoltaic panel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética da geração de energia elétrica do Brasil (ano base 2020).....	21
Figura 2 – Ilustração de um sistema de rastreador solar com um grau de liberdade.....	23
Figura 3 – Ilustração de um sistema de rastreador com solar com dois graus de liberdade.	23
Figura 4 – Rastreador solar passivo.....	24
Figura 5 - Rastreador solar ativo utilizando controlador com indicação dos componentes do sistema fotovoltaico.....	25
Figura 6 - Rastreador solar com arduino e sensor LDR.	26
Figura 7 - Dilatação em uma barra redonda de aço.	27
Figura 8 – Molas de torção em espiral.	28
Figura 9 – Mola helicoidal.....	29
Figura 10 - Fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo.	32
Figura 11 – Número de publicações por ano de artigos relacionados ao tema de rastreadores solares na base de dados <i>Scopus</i>	33
Figura 12 – Números dos tipos de publicações relacionada a rastreadores solares na base de dados <i>Scopus</i>	34
Figura 13 - Informação das áreas dos artigos relacionados a rastreadores solares na base de dados <i>Scopus</i>	34
Figura 14 – Filme de poliéster leitoso.	36
Figura 15 – Lâmina bimetálica helicoidal geralmente utilizada para termômetro.	37
Figura 16 – Lâmina bimetálica sob forma de termômetro.	38
Figura 17 – Transferidor de 180°.	38
Figura 18 – Chapa de latão para a haste do termômetro.	38
Figura 19 – Chapa de latão pintada de preto fosco para acoplar a haste do termômetro.	39
Figura 20 – Frasco de vidro comum com capacidade de um litro.....	39
Figura 21 - Pannel fotovoltaico utilizado para padronizar as dimensões da estrutura	40
Figura 22 – Projeto da estrutura para estudo do rastreador solar	40
Figura 23 - Cordas de relógio utilizadas para se obter as dimensões das espirais	41
Figura 24 - Projeção da espiral em vista 3D.....	41
Figura 25 - Projeção da montagem da espiral na estrutura.....	41
Figura 26 - Projeção da montagem com o fio de bronze em formato helicoidal.	42
Figura 27 - Projeção da montagem da lâmina bimetálica sob forma de termômetro com uma pequena estufa.	43

Figura 28 – Inclínômetro simples.....	44
Figura 29 – Termômetro infravermelho.	44
Figura 30 – Medidor de energia solar MES-100	44
Figura 31 – Inclínômetro digital.....	45
Figura 32 - Experimento de exposição ao sol das amostras dos materiais.....	46
Figura 33 – Estrutura construída para gerar uma estufa no termômetro bimetalico.	48
Figura 34 – Posicionamento do termômetro bimetalico a 33°.	49
Figura 35 – Primeira situação de exposição da lâmina bimetalica sob forma de termômetro .	49
Figura 36 – Segunda situação de exposição da lâmina bimetalica sob forma de termômetro .	50
Figura 37 – Terceira situação da lâmina bimetalica sob forma de termômetro	50
Figura 38 – Quarta situação da lâmina bimetalica sob forma de termômetro	51
Figura 39 – Quinta situação da lâmina bimetalica sob forma de termômetro.....	51
Figura 40 – Sexta situação de exposição da lâmina bimetalica sob forma de termômetro	52
Figura 41 – Lâmina bimetalica sob forma de termômetro com um pedaço de célula fotovoltaica acoplada.	52
Figura 42 – Vistas da estrutura final de <i>metalon</i> que será utilizado para teste da espiral metálica.	54
Figura 43 - Espiral construída com a fita de latão (liga com 60% de cobre + 40% de zinco) .	54
Figura 44 - Espiral construída com o material aço (liga com 98,5% de ferro + 0,5 % de carbono e sílico, enxofre e fosforo).....	55
Figura 45 – Estrutura do rastreador solar em latão.....	55
Figura 46 – Barra vazada inserida dentro da mola de bronze.	56
Figura 47 – Barra externa de bronze.	56
Figura 48 – Estrutura construída para o fio de bronze em formato helicoidal.	57
Figura 49 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da primeira situação.	58
Figura 50 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da segunda situação.....	59
Figura 51 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da terceira situação.....	59
Figura 52 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da quarta situação.....	60
Figura 53 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da quinta situação.....	60
Figura 54 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da sexta situação.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dilatação linear dos materiais encontrados no mercado	28
Tabela 2 – Resultados da busca na base de dados <i>Scopus</i>	33
Tabela 3 - Principais trabalhos utilizados para embasamento do estudo.	35
Tabela 4 - Coeficiente dos materiais escolhidos	36
Tabela 5 - Coeficiente do material da mola utilizada.....	37
Tabela 6– Média dos valores registrados das amostras metálicas.....	53
Tabela 7 – Valores registrados das amostras no primeiro dia	69
Tabela 8 – Valores registrados das amostras no segundo dia.....	70
Tabela 9 – Valores registrados das amostras no terceiro dia.....	71
Tabela 10 – Valores registrados das amostras no quarto dia.....	72
Tabela 11 – Valores registrados das amostras no quinto dia.....	73
Tabela 12 – Valores registrados das amostras no sexto dia	74
Tabela 13 – Valores registrados das amostras no sétimo dia	75
Tabela 14 – Valores registrados das amostras no oitavo dia.....	76
Tabela 15 – Valores registrados das amostras no nono dia.....	77
Tabela 16 – Valores registrados das amostras no décimo dia	78
Tabela 17 – Primeira situação da lâmina bimetálica.	79
Tabela 18 – Segunda situação da lâmina bimetálica.	79
Tabela 19 – Terceira situação da lâmina bimetálica.....	80
Tabela 20 – Quarta situação da lâmina bimetálica.	80
Tabela 21 – Quinta situação da lâmina bimetálica.	81
Tabela 22 – Sexta situação da lâmina bimetálica.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GW	Giga watts
PERC	<i>Passivated emitter and Rear Cell</i>
LDR	<i>Light dependent resistor</i>
3D	<i>Three dimension</i>
MES	Medidor de energia solar

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ΔL	Variação do comprimento
L_0	Comprimento inicial
α	Coeficiente de dilatação do material
$\Delta \theta / \Delta T$	Variação de temperatura
m	Metros
mm	Milímetros
°C	Graus celsius
π	Número pi
d	Diâmetro
C	Circunferência
X	Número de dilatações
W/m ²	Watts por metro quadrado
ΔGT	Variação de ângulo trigonométrico
g	Gramas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Estrutura da dissertação	18
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	Objetivo geral	19
2.2.	Objetivos específicos	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1.	Desenvolvimento humano no setor energético	20
3.2.	Energia solar, células e sistemas fotovoltaicos	20
3.3.	Rastreadores solares.....	22
3.4.	Ganho de eficiência energética com os rastreadores solares para estruturas móveis 26	
3.5.	Dilatação térmica	27
3.6.	Dilatação térmica linear	27
3.7.	Molas de torção em espiral e molas helicoidais	28
3.8.	Estudos correlatos	29
4.	MATERIAL E MÉTODO	31
4.1.	Metodologia.....	31
4.2.	Etapas do trabalho.....	31
4.2.1.	Revisão bibliográfica	32
4.3.	As três metodologias adotadas.....	35
4.4.	Material utilizado.....	36
4.4.1.	Materiais do experimento com a mola em espiral.	36
4.4.2.	Materiais do experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.	36
4.4.3.	Materiais do experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro..	37
4.5.	Definição das estruturas.....	39
4.5.1.	Experimento com a espiral metálica.....	39
4.5.2.	Experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.	42
4.5.3.	Experimento utilizando a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.	42
4.6.	Equipamentos	43
4.7.	Experimentos com as espirais metálicas.....	45
4.7.1.	Experimento com as amostras dos materiais pintados de preto fosco e de cor natural. 45	
4.8.	Experimento com o fio de bronze no formato helicoidal.	47
4.9.	Experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.	47

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1.	Experimentos realizados.....	53
5.1.1.	Experimento com espirais.....	53
5.1.2.	Experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.	56
5.1.3.	Experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.	57
6.	CONCLUSÕES.....	62
7.	TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS		64
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA		68
APÊNDICE A1		69
APÊNDICE A2		79
TRABALHOS DESENVOLVIDOS DURANTE O MESTRADO		82

1. INTRODUÇÃO

A energia solar térmica é destinada a menos de 1 % da necessidade do calor mundial. O seu maior uso é para o aquecimento de água. No Brasil, existe 2 % de instalação em comparação ao mundo. Em 2017, houve um aumento de 17 % de novas instalações para o setor industrial (IEA, 2019).

A energia, nas suas diversas formas, é de vital importância à sociedade, devido às necessidades que o mundo apresenta, tais como melhoria da qualidade de vida, crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental. A energia é considerada essencial quando relacionada ao desenvolvimento humano, sobretudo as energias renováveis e seus impactos para a sustentabilidade ambiental (SCHULTZ; DALLAVECHIA, 2022).

O calor é a forma de energia que representa o maior consumo quando se trata das indústrias. Ele é equivalente a mais de um terço de energia consumida em escala global. Mas esse fato, traz um alerta preocupante para o setor industrial devido as emissões causadas pelo processo de combustão. Esse processo ampliou a busca por uma solução que não agredisse o meio ambiente e surgiu como opção viável o uso de energias renováveis. A partir do ano 2000, as pesquisas avançaram para tornar possível o uso destas energias em diferentes setores (CASCAES, 2019).

Segundo SOUZA et al. (2020) a literatura sobre a situação atual de energias renováveis no Brasil, apresenta referências excelentes para ajudar no combate à diminuição de danos infringidos ao meio ambiente, pois quanto maior for o seu uso e sua viabilização para o uso comum, menor será a demanda de retirada de recursos naturais e por consequência, haverá uma diminuição da emissão de gases que resultam no efeito estufa.

A partir do início do século XXI, a crescente necessidade de geração de energia elétrica conduziu a sociedade a focar em pesquisas sobre meios alternativos de geração. E um dos resultados foi a geração elétrica por meio de arranjos fotovoltaicos, conhecidos também por energia fotovoltaica. A importância destes meios, tem se mostrado significativa por oferecer energia com um impacto pequeno ao meio ambiente, uma vez que ela é limpa. Cada arranjo desta energia, tem características únicas, pois a captação de energia não é considerada linear e isso demanda técnicas de controle operacional em que auxiliem no processo para aumentar a eficiência do sistema, por exemplo, a irradiação solar ao longo do dia sofre variação de valor (MOREIRA et al. 2022).

De certa forma, todas as fontes de energia, podem ser consideradas formas indiretas de energia solar. A radiação solar ainda pode ser utilizada de forma direta, como energia térmica, para aquecer fluídos, ambientes e para gerar potência mecânica ou elétrica através de alguns materiais específicos, destacando os sistemas termoelétrico e o fotovoltaico. A fonte de energia solar é considerada barata, no entanto, o incentivo financeiro atual não é o suficiente para ampliar o campo de pesquisas dessa área (GÉLIO; CÉSAR, 2021).

Os sistemas que auxiliam na melhor captação solar, conhecidos como rastreadores solares, normalmente são utilizados em grandes aplicações comerciais ou industriais, pois necessitam de espaço para o movimento dos painéis solares e com isso os gastos de manutenção aumentam, uma vez que o sistema está sujeito a fatores climáticos, como vento ou chuva. Quando se trata de rastreadores solares, pode-se destacar um grupo específico que é considerado um dos principais tipos, que são os com mecanismos de caráter passivo. Eles são classificados assim por fazerem uso do calor ou do efeito fotovoltaico proveniente do Sol para acionar algum sistema próprio de movimento. Um dos exemplos encontrados na literatura, é o que faz uso da expansão térmica do ar comprimido. Esse grupo é aplicado a sistemas fotovoltaicos simples, ou seja, que não sejam complexos em comparação aos outros rastreadores do mercado e por essa razão não oferecem uma alta eficiência a baixas temperaturas (SUMATHI et al. 2017).

A tendência atual setor de energia solar é utilizar os rastreadores solares para potencializar o ganho energético dos painéis fotovoltaicos. A utilização dos rastreadores solares passivos surge como uma opção mais atrativa de desenvolvimento de pesquisa pois pode oferecer um rendimento maior, sendo que este grupo utiliza a própria energia solar para realizar o deslocamento do painel ao longo do dia. Sendo assim, a área da pesquisa da energia solar está apta a receber novos desenvolvimentos de mecanismos para obter um melhor aproveitamento de radiação solar, por meio do deslocamento efetivo do painel fotovoltaico (RENOSTO *et al.* 2018).

Entre os rastreadores solares passivo não há um mecanismo que faça uso de dilatação metálica para movimentar um painel assim que ele sofra radiação solar ao longo do dia. Essa metodologia pode resultar em um mecanismo que envolva menores custos e retorne um bom rendimento.

Sendo assim, esta pesquisa visa apresentar uma forma inovadora de rastreador solar passivo para sistemas de um eixo de rotação, ou seja, um grau de liberdade, onde seu mecanismo de movimento se baseia na dilatação linear de um material metálico, com a incidência dos raios solares, ao longo do dia. Este mecanismo é simples e apresenta melhores valores de captação

da energia solar. Serão feitas pesquisas na literatura de diferentes tipos de rastreadores solares passivos, projeto e construção do rastreador e os testes.

1.1. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos:

O primeiro capítulo trata da Introdução, com a apresentação do estado da arte sobre as energias solares e a proposta do desenvolvimento da dissertação.

O segundo capítulo se trata dos Objetivos e da estrutura da dissertação.

O terceiro capítulo é a Revisão Bibliográfica sobre energia solar, painéis solares e rastreadores solares.

O quarto capítulo é sobre o material e método adotados neste trabalho, onde está a parte experimental com os ensaios detalhados do funcionamento do sistema ao longo do dia e quais equipamentos e parâmetros foram utilizados nos experimentos.

O quinto capítulo são os resultados e discussões obtidos durante a parte experimental e as análises através de textos equações, tabelas, gráficos, na mesma sequência dos experimentos.

O sexto capítulo trata das conclusões parciais como respostas aos objetivos e traz propostas para desenvolvimento futuro.

Após os capítulos estão dispostas as referências que foram utilizadas neste trabalho.

2. OBJETIVOS

Os objetivos dessa dissertação serão o geral e os específicos.

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa dissertação foi desenvolver uma proposta conceitual de mecanismo que auxilie na movimentação de um sistema de captação de energia solar, em torno do seu eixo central, para proporcionar a melhor e maior incidência de raios solares sobre ele, gerando economias de custos e ganho energético total por não utilizar um sistema elétrico. Assim apresenta-se um sistema inovador de rastreador solar passivo, para sistema com somente um eixo de rotação ou um grau de liberdade.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos da dissertação foram:

- a) Realizar os estudos bibliográficos e análises necessários para idealização e fundamentação da estrutura do rastreador solar com lâminas metálicas;
- b) Projetar e fabricar as estruturas de rastreadores solares com mecanismo de dilatação térmica linear.
- c) Executar os experimentos, coletar e organizar os dados, analisar os resultados com os equipamentos expostos a radiação solar.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as literaturas utilizadas de cada tema com relação direta ao projeto.

3.1. Desenvolvimento humano no setor energético

A produção de energia para a humanidade está ligada diretamente com as suas questões de desenvolvimento econômico. Ela teve início na revolução industrial por meio da aplicação de máquinas a vapor no setor de produção. Em outros momentos históricos, como a segunda revolução industrial e a crise mundial na década de 1970, houve aprimoramentos em relação a produção de energia. Desde então, as matrizes energéticas não renováveis como o petróleo e gás natural que são amplamente utilizadas pela humanidade, tem causado enormes danos ao meio ambiente, com a emissão constante de poluentes e gases do efeito estufa, causando assim um risco a proteção ambiental (SÁ et al. 2019).

Os incentivos para as fontes renováveis devem ser considerados práticas constantes, que em conjunto com outras políticas sociais podem trazer ganhos consideráveis para o desenvolvimento da sociedade em geral. Em certos casos, pode haver outras vantagens para a comunidade que realizar essa prática, como compensações de reforma estruturais de escolas e prédios públicos, compensação econômica com redução de custos em relação ao fornecimento de energia, principalmente elétrica (SILVA; SOUZA, 2017).

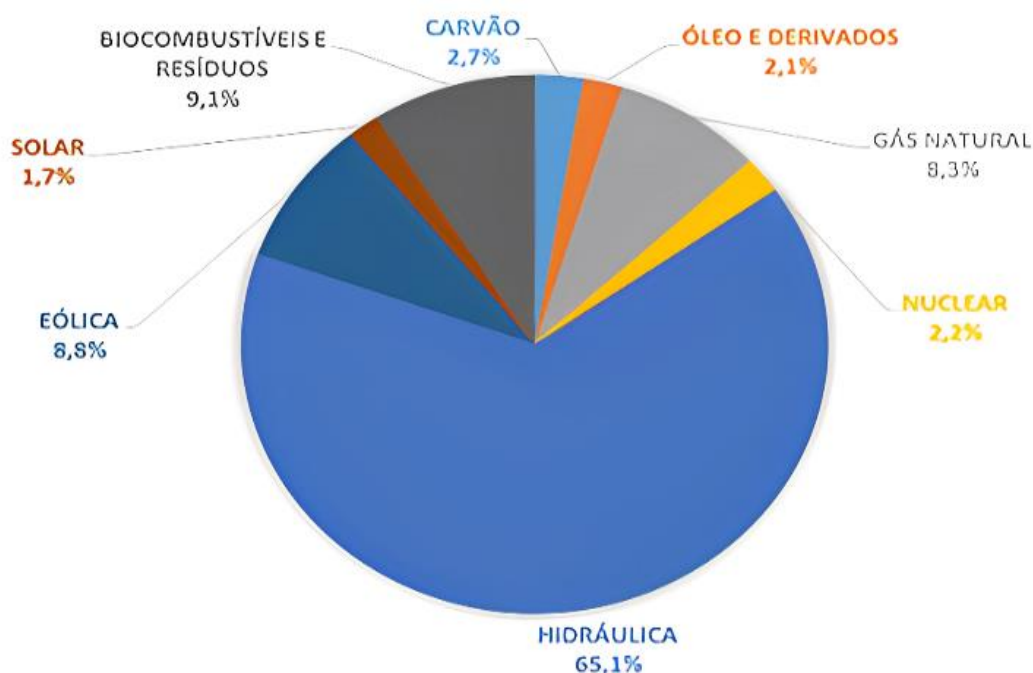
3.2. Energia solar, células e sistemas fotovoltaicos

Em 2019, o mercado de energia solar fotovoltaica aumentou cerca de 12 %, passou para 115 GW. Aquele ano terminou com forte demanda na Europa, Estados Unidos e mercados emergentes em todo o mundo, mais do que compensando um declínio substancial na China, o maior mercado individual. Sem incluir a China, o mercado global de energia solar fotovoltaica cresceu cerca de 44% em 2019. O total global de 627 GW, que inclui capacidade dentro e fora da rede, onde tinha menos de 23 GW em 2009 (REN21, 2020).

Segundo (FLECHER, 2022), no Brasil, o setor energético tem uma atenção maior devido as características naturais únicas, geológicas e geográficas. O artigo traz um estudo em que compara o Brasil e o mundo, em relação as participações de energias renováveis na matriz energética e o resultado da pesquisa é 14% para o mundo. O Brasil alcançou 48%, no entanto,

englobando fontes como biomassa, carvão vegetal, biodiesel, biogás, eólica, solar e hidráulica. Na Figura 1 estão dispostas as porcentagens das fontes energéticas no Brasil.

Figura 1 - Matriz energética da geração de energia elétrica do Brasil (ano base 2020).



Fonte: Flecher (2022),

A energia solar diretamente transformada em energia elétrica é chamada de energia fotovoltaica. Esse processo ocorre por meio de materiais semicondutores, que tem como característica principal possuir bandas de energia, sendo uma por elétrons e a outra vazia. O material comumente usado é o silício. Isso se deve porque os átomos deste material, possuem quatro elétrons que se ligam aos outros que estão ao redor, assim criando uma rede. Os componentes de um sistema fotovoltaico são bloco gerador; bloco de condicionamento e potência e um bloco de armazenamento. O bloco gerador é onde estão os arranjos fotovoltaicos, o bloco de condicionamento, estão os dispositivos de proteção, supervisão e controle e por último o bloco de armazenamento, onde estão as baterias e quaisquer formas de armazenamento (SILVA; ARAÚJO, 2022).

Os sistemas fotovoltaicos se caracterizam por serem uma fonte alternativa de energia limpa, que com captação térmica, geram eletricidade, não causando danos ao meio ambiente. A maior dificuldade desta área na atualidade se deve a questão financeira, ou seja, a falta de investimentos governamentais ou de outras fontes. Mesmo assim, esta fonte tem pontos positivos nesse aspecto, como a questão de reciclagem de seus itens descartados, pois com o

aproveitamento desses materiais podem diminuir os custos de um novo sistema. Com essa possível baixa no valor, há a possibilidade de a distribuição desta fonte renovável aumente, diversificando as matrizes energéticas encontradas no mercado (CAVALCANTE et al. 2022).

Existem três gerações de tecnologias fotovoltaicas, que são caracterizadas por sua eficiência e participação no mercado. A primeira geração é a de silício cristalina apresentam maior participação na sociedade também é a que apresenta maiores eficiências. A segunda se trata da tecnologia *Passivated Emitter and Rear Cell* (PERC), que por sua vez é aplicada as células de silício cristalino, aumentando sua eficiência, sendo que este processo aumenta a quantidade luz absorvida na parte posterior da célula. A terceira e última geração, se trata das tecnologias recentes, que na maioria dos casos, ainda se encontra em testes laboratoriais. Um exemplo destas tecnológicas seria a célula fotovoltaica orgânica, onde tem o foco voltado para sustentabilidade ambiental aprimorada. No ano de 2019, o mercado de sistemas fotovoltaicos era, em sua grande parte, formado pela tecnologia de silício policristalino. A partir do ano de 2020 os módulos de silício monocristalino juntamente com a tecnologia PERC, assumiram boa parte do mercado, devido a sua elevada eficiência (CREMASCO et al. 2021).

3.3. Rastreadores solares

O primeiro rastreador solar construído foi o de Finster em 1962, onde este sistema era supostamente mecânico e resultava em um aumento de desempenho muito pequeno com relação aos sistemas fixos fotovoltaicos. Em 1963, Saavedra apresentou uma versão melhorada deste rastreador onde ela tinha uma unidade de controle eletrônico automático e um pireliômetro para medir a quantidade da radiação solar que chegava ao painel. Em 1975, McFee sugeriu um outro tipo de rastreador solar em que possuía um algoritmo, onde era possível calcular a energia solar recebida e outros parâmetros. Em pouco tempo depois, Semma e Imamura utilizaram um microprocessador para ajustar as posições dos painéis do sistema fotovoltaico de forma mais precisa (NSENGIYUMVA et al. 2018).

O rastreador solar é um dispositivo que auxilia o sistema fotovoltaico a acompanhar a luz solar ao longo do dia, com o objetivo de aumentar a irradiação recebida sobre o equipamento de captação solar (RECA-CARDEÑA; LÓPEZ-LUQUE, 2018).

Prado et al., (2015), realizou uma revisão bibliográfica sobre rastreadores solares e destacou os principais conceitos encontrados em relação aos eixos dos sistemas, descrevendo suas vantagens e desvantagens. O primeiro tipo descrito por ele foi o de apenas um eixo. Esses sistemas possuem limitações, e abrangem apenas uma faixa, quando se trata de luz solar. A

Figura 2, é uma ilustração deste sistema indicando onde é realizado sua movimentação.

Figura 2 – Ilustração de um sistema de rastreador solar com um grau de liberdade.



Fonte: Prado et al. (2015).

A principal vantagem deste sistema é a facilidade para a estrutura movimentar. Quando se trata de ganho energético seu rendimento é menor e isso deve a sua inclinação nos outros eixos serem fixos.

O segundo tipo de rastreador, apresentado por PRADO et al. (2015) é o sistema de dois eixos, onde ele possui duas faixas de abrangências e pode alcançar diferentes ângulos. Na Figura 3, podem ser observadas as direções que ele se movimenta.

Figura 3 – Ilustração de um sistema de rastreador solar com dois graus de liberdade.



Fonte: Prado et al. (2015)

Sua principal desvantagem é a sua dificuldade de movimentação pois necessita de uma constante alteração de ângulo para que sua função principal seja executada, e como principal

vantagem, é que ele pode render um alto ganho energético, sendo que sua alta mobilidade permite o recebimento de uma maior porcentagem de irradiação solar ao longo do dia.

Hafez et al. (2018) traz outra classificação dos rastreadores e os divide entre passivos e ativos. Os passivos têm uma construção teoricamente simples, sua principal característica é que não fazem uso de fonte de alimentação externa e de controle algum para operarem. No entanto, isso acaba resultando em uma baixa eficiência, se limitam a configurações de um eixo e seu pleno funcionamento só acontece em regiões com temperaturas baixas. Na Figura 4 pode ser observado um sistema que faz uso de fluídos para movimentar a estrutura ao longo do dia, ela ainda indica o direcionamento dos mesmos e da energia solar que irradia o painel solar.

Figura 4 – Rastreador solar passivo



Fonte: Passos (2016).

O outro grupo citado por HAFEZ et al. (2018), são os rastreadores solares do tipo ativo. Eles por sua vez apresentam maior eficiência, podem operar sobre qualquer condição meteorológica, e possuem restrições de sistema, sendo utilizados tanto na configuração de um eixo como de dois. Por outro lado, é necessário um controle externo para seu pleno funcionamento, sua construção é de maior complexidade e é necessário uma alimentação elétrica. Na Figura 5, está apresentando um exemplo e a disposição dos componentes de sistema comum com rastreador ativo, que incluem controlador, sensor de tempo real, atuador linear e

uma unidade giratória.

Figura 5 - Rastreador solar ativo utilizando controlador com indicação dos componentes do sistema fotovoltaico.



Fonte: Passos (2016)

Queiroz et al. (2018) realizou um trabalho com subclassificações de rastreadores solares. A primeira é a de controle em malha fechada, que tem como diferencial a possibilidade corrigir erros de movimentação e compensar perturbações, o traz uma orientação precisa, no entanto, é um sistema complexo de controle e tem custos elevados. O de controle com malha aberta é mais simples em relação a sua construção por consequência um custo menor. No entanto, para se fazer uso adequado deste sistema é necessário um estudo preliminar para calibrar seus parâmetros de forma correta.

Outro tipo de sistema citado por este autor é o que adota um rastreamento baseado em data e tempo. Este é de construção simples, ele não sofre perturbações, mas tem eficiência baixa e necessita de *know-how* para sua configuração.

Há também um sistema que se baseia em sensores, ele tem uma maior eficiência em relação aos outros e um rastreamento preciso. No entanto, seu algoritmo é complexo e necessita de uma modelagem precisa dos sensores. A Figura 6 apresenta um protótipo de rastreador solar que faz uso de um controlador e um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*).

Figura 6 - Rastreador solar com arduino e sensor LDR.



Fonte: Straub (2020).

Um sistema que Queiroz (2018) também descreveu é o que combina o uso de sensores juntamente com o sistema de data e tempo para ajustar posicionamento ao longo do dia. Os ganhos de ambos os sistemas são aproveitados, no entanto, a sua complexidade é alta, é de alto custo e seu pré-requisito operacional é elevado.

3.4. Ganho de eficiência energética com os rastreadores solares para estruturas móveis

A principal diferença entre sistemas fotovoltaicos de estruturas fixas e móveis de são a utilização do dispositivo rastreador solar, pois eles são empregados apenas em estruturas móveis para realizar o deslocamento diário da mesma afim de obter maior radiação solar (MOURAD *et al.* 2022).

A geração de energia através de sistemas de rastreamento solar é distribuída mais uniformemente ao longo do dia, uma vez que os sistemas fotovoltaicos fixos são otimizados para operação no Brasil das 9h00 às 14h00. Os sistemas de rastreamento solar podem reduzir a necessidade de armazenamento local necessária, reduzindo potencialmente os custos (BRITO *et al.*, 2019).

Sumathi *et al.* (2017) concluíram em seu estudo realizado referente a rastreadores solares, que o ganho aproximado da utilização destes mecanismos, sejam do tipo ativo ou passivo, em estruturas captadoras de energia fotovoltaica é de 30% em relação a uma estrutura de captação que esteja imóvel.

Abdelghani-idrissi *et al.* (2018) apresentam a mesma informação a respeito do ganho do uso de rastreadores solares em relação a sistemas que não tenham movimentação.

Segundo Abdunnabi *et al.* (2018) também destacaram o ganho resultante de 30 % do uso de rastreadores solares, mas este ganho foi levando em consideração a utilização de motores,

controladores, fonte de energia externa ou quaisquer outros itens de instalação.

3.5. Dilatação térmica

Quando a temperatura de um corpo sólido ou líquido aumenta, a agitação das partículas que o formam aumenta. Em geral, isso faz crescer a amplitude da vibração das moléculas e a distância média entre elas, resultando em aumento nas dimensões do corpo. Esse aumento é chamado dilatação térmica. Da mesma forma, a diminuição da temperatura geralmente reduz as dimensões do corpo (SOUZA, 2007).

A dilatação térmica é um fenômeno que ocorre em sólidos, líquidos e gases resultante de uma mudança de temperatura produzida neles (FREITAS, 2021).

3.6. Dilatação térmica linear

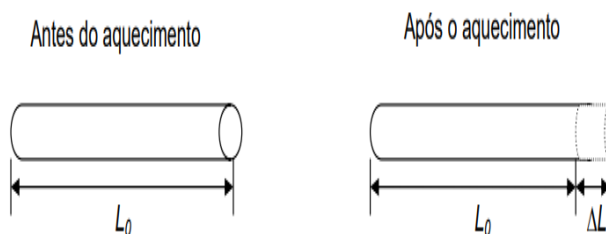
Quando uma barra metálica sofre uma alteração de temperatura e o seu comprimento inicial se alterou este fenômeno é a dilatação térmica linear. A Equação 1 apresenta essa dilatação linear dos materiais (ΔL). Sendo ela a multiplicação do comprimento inicial, L_0 , pelo coeficiente de dilatação do material, α , e pela variação de temperatura, $\Delta\theta$.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

Fonte: Carneiro (2019).

A Figura 7 apresenta o fenômeno da dilatação ocorrendo em um corpo metálico. O comprimento inicial quando aquecido apresenta uma dilatação ΔL .

Figura 7 - Dilatação em uma barra redonda de aço.



Fonte: Araújo Sobrinho e Souza (2006).

A Tabela 1 apresenta os valores de dilatação linear de alguns materiais encontrados no mercado.

Tabela 1 - Dilatação linear dos materiais encontrados no mercado

Coefficientes de dilatação linear	
Material	α [/K ou (/°C)]
Alumínio	$2,4 \times 10^{-5}$
Latão	$2,0 \times 10^{-5}$
Bronze	$1,8 \times 10^{-5}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-5}$
Monel	$1,39 \times 10^{-5}$
Aço	$1,2 \times 10^{-5}$
Vidro	$0,4-0,9 \times 10^{-5}$
Invar (liga de 64% ferro – 36% níquel)	$0,09 \times 10^{-5}$
Quartzo	$0,04 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de Santos (2023).

3.7. Molas de torção em espiral e molas helicoidais

Uma mola é um objeto que tem a capacidade de armazenar energia. Existem diversas composições e formatos de molas, pois elas estão presentes em diversos objetos e até em mecanismos de grande complexidade. Duas variações comumente utilizadas são as molas de torção em espiral e as molas helicoidais. As molas de torção em espiral normalmente são fabricadas em aço e enroladas em estado plano, fixando o material desejado de mola em um eixo circular e fixando a sua outra extremidade a um estojo de metal que é projetado para liberar energia rotacional na forma de torque (TECH SPRING, 2023).

A Figura 8 ilustra a mola de torção em espiral.

Figura 8 – Molas de torção em espiral.



Fonte: Tech Spring (2023).

E a Figura 9 ilustra uma imagem da citada mola helicoidal.

Figura 9 – Mola helicoidal



Fonte: Nascimento (2023).

3.8. Estudos correlatos

O interesse na utilização da radiação solar como fonte alternativa de energia aumentou nas últimas décadas por razões económicas, principalmente após a crise do petróleo em 1973, quando a investigação nesta área se tornou ativa nos Estados Unidos e na Europa. Hoje, este interesse expandiu-se para incluir não só a utilização da radiação como fonte de energia limpa e renovável, mas também o reconhecimento do clima e das alterações climáticas como questões importantes para a preservação da vida humana (PAIVA, 2009).

O Brasil, por suas características tropicais, tem em quase todo o território e durante o ano inteiro, grande potencial de oferta de energia solar. Enquanto nos países de clima temperado o pico de uso da energia elétrica ocorre no inverno, exatamente quando a insolação é mínima, no Brasil acontece o contrário, o que aumenta a atratividade do uso da energia solar (RODRIGUES; FIGUEIRA, 2021).

Segundo Zazula et al. (2019) comparando sistemas fixos com sistemas que dispõe de algum mecanismo de rastreamento solar, observa-se incremento teórico de 57% da energia absorvida pelos aparatos que possuem sistema de rastreamento. Esse resultado pode ser aplicado para satélites naturais e artificiais, porém esse valor pode variar para mais ou para menos, de acordo com a nebulosidade local, reflexões diversas, índice de radiação, precisão do rastreamento etc.

Com base nas referências bibliográficas podemos definir as questões da pesquisa que estão entorno da idealização de um rastreador solar é importante pois ele pode retornar até 30% de rendimento para sistemas fotovoltaicos. Ele deverá ser do tipo passivo pois eles fazem uso

da própria energia solar, tornando mais econômico em relação aos outros modelos e que o foco a energia renováveis é de extrema importância no contexto atual da sociedade.

A pesquisa se delimita ao aprimoramento do funcionamento mecânico do sistema de um eixo e da busca por um melhor rendimento de um sistema fotovoltaico por meio de seu deslocamento diário.

4. MATERIAL E MÉTODO

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos para o desenvolvimento do estudo, onde incluem materiais e todos os aspectos referentes a parte experimental da pesquisa.

Este estudo propôs projetar um rastreador solar passivo com caráter inovador, e para seu embasamento foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os tipos de rastreadores solares.

4.1. Metodologia

A natureza desta pesquisa é básica e aplicada, pois visa melhorar técnicas já adotadas e associadas e aplicada se deve ao fato de se esperar um resultado imediato para aplicação.

A pesquisa quantitativa foca na determinação de indicadores e tendências reais do caso estudado, os quais podem ser dados representativos e objetivos. Sua base é focada na questão físico-numérica, não visando a importância da individualidade dos dados. Ela aceita que o coletivo é de maior importância para o estudo. Com esses conceitos, esse método de pesquisa fortalece a questão estatística do experimento realizado (MUSSI et al., 2019).

Com essa questão estudada o método selecionado para o desenvolvimento deste trabalho foi o quantitativo para o estudo dos possíveis ganhos nos diversos experimentos realizados.

Os objetivos desta pesquisa são exploratórios pois se trata de responder a hipóteses de construção de mecanismos de rastreadores solares.

O procedimento técnico adotado para esta pesquisa são os de casos experimentais.

4.2. Etapas do trabalho

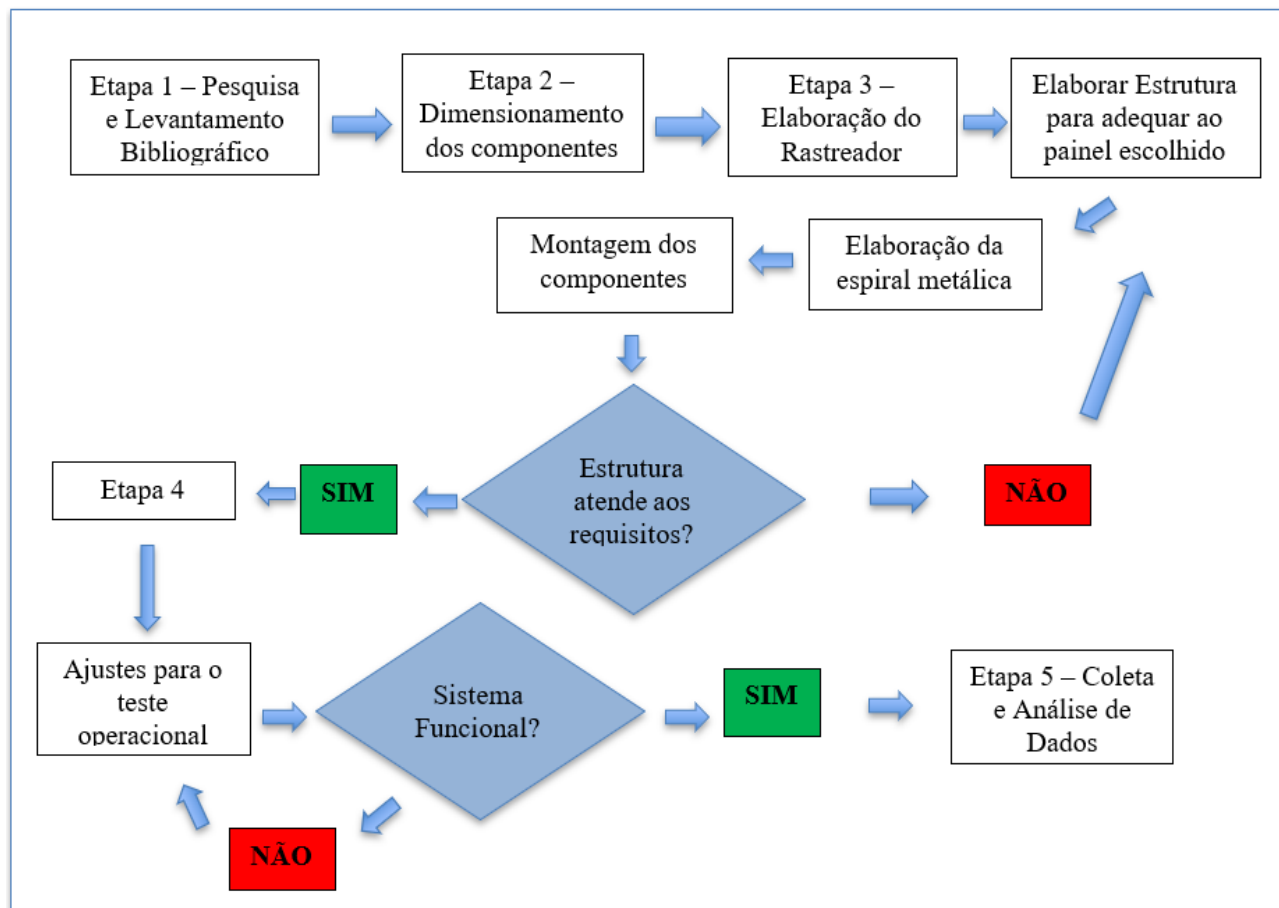
Para realizar a primeira etapa do trabalho foi realizado o levantamento bibliográfico com uma consulta nas bases de dados mais utilizadas no meio acadêmico, sendo elas o Google Acadêmico e *Scopus*, buscando encontrar trabalhos que apresentassem os mecanismos de rastreadores solares passivos. Para a segunda etapa, é apresentado um mecanismo de rastreador solar passivo de caráter inovador. A pesquisa bibliográfica da primeira corrobora o seu ineditismo. O processo envolveu ao todo cinco etapas. Sendo elas:

- Etapa 1 – Pesquisa e levantamento bibliográfico
- Etapa 2 – Dimensionamento dos componentes
- Etapa 3 – Elaboração do rastreador

- Etapa 4 – Validação da estrutura
- Etapa 5 – Coleta e análise de dados

O detalhamento específico de cada etapas estão descritas na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo.



Fonte: Autor (2023).

4.2.1. Revisão bibliográfica

Primeiramente foi realizada a busca nas bases de dados citadas. Para a análise dos artigos, os critérios de inclusão e exclusão se basearam em verificar por meio dos resumos e palavras chaves dos artigos, se possuíam relação direta ao tema estudado.

A base de dados consultada foi a *Scopus*. As palavras chaves inicialmente também foram *solar* e *tracker*. A Tabela 2 apresenta os dados obtidos na busca nessa base de dados. A *Scopus* oferece um refinamento muito mais avançado de pesquisa, com ferramentas como adicionar palavras chaves ao seu código de pesquisa, ou delimitar a área desejada.

Tabela 2 – Resultados da busca na base de dados *Scopus*

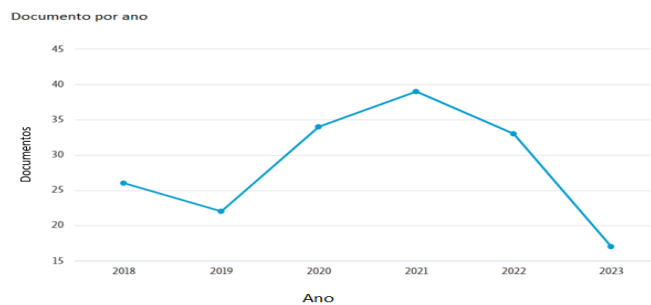
Item	Scopus	Ano	Keywords	Área
1	9240	Todos os anos	<i>Solar tracker</i>	Todas
2	5514	2018 á 2024	<i>Solar tracker</i>	Todas
3	4870	2018 á 2024	<i>Solar tracker</i>	Energia e Engenharia
4	4807	2018 á 2023	<i>Solar tracker</i>	Energia
5	3094	2018 á 2023	<i>Solar tracker</i> <i>Solar energy</i>	Energia

Fonte: Autor (2023).

O último refinamento utilizado na própria base de dados foi buscar delimitar a busca de trabalhos com títulos que continham as palavras energia solar ou energia, houve um resultado de 171 trabalhos que estavam ligados diretamente a pesquisa. Com esses dados foi realizado uma análise específica desses dados.

A primeira análise que foi extraída desses dados, foi a de publicação por ano, onde se tem que o maior pico de publicação desta área foi em 2021 com 39 trabalhos encontrados, o que mostra que é um tema recente e ressalta a importância de novos trabalhos para esta linha. A Figura 11 apresenta informações sobre as publicações por ano de artigos relacionados ao tema de rastreadores solares. Essa primeira análise é da base de dados da *Scopus*.

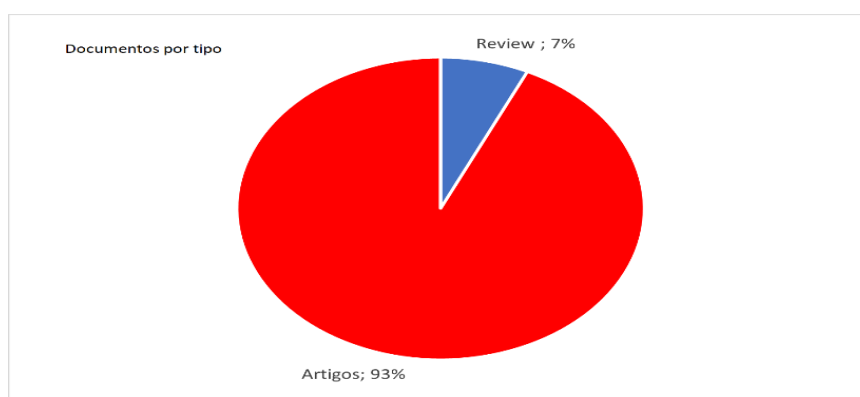
Figura 11 – Número de publicações por ano de artigos relacionados ao tema de rastreadores solares na base de dados *Scopus*.



Fonte: Adaptada da base de dados *Scopus* (2023).

A segunda análise extraída desses dados por meio das ferramentas disponíveis pela *scopus*, foi a dos tipos encontrados nesta busca e o resultado foi de 93% de artigos e 7% de *reviews* sobre o tema. A Figura 12 apresenta informações dessas porcentagens, e com isso é possível ver a escassez de artigos de revisão neste tema, que pode ser considerado de extrema importância para os tempos atuais, devido a busca pelo aumento da eficiência das energias renováveis.

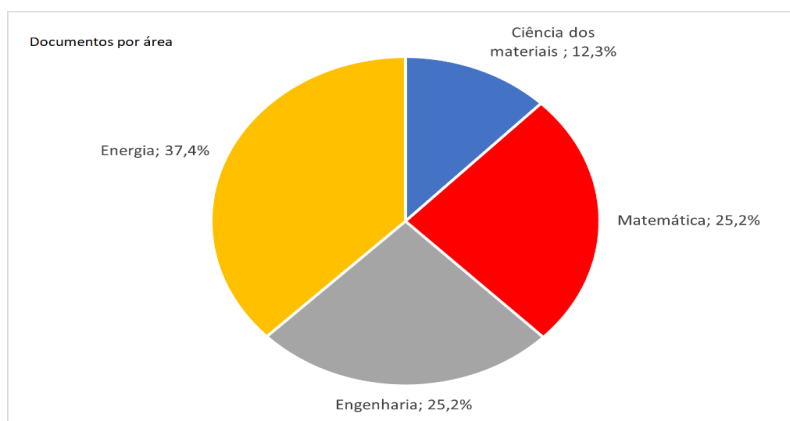
Figura 12 – Números dos tipos de publicações relacionada a rastreadores solares na base de dados *Scopus*.



Fonte: Adaptada da base de dados *Scopus* (2023).

A última análise foi sobre em que áreas os artigos estão relacionados e permite um refinamento maior e uma pesquisa concisa. Na Figura 13 estão apresentados os dados em porcentagem das áreas.

Figura 13 - Informação das áreas dos artigos relacionados a rastreadores solares na base de dados *Scopus*.



Fonte: Adaptada da base de dados *Scopus* (2023).

Com a pesquisa inicial realizada nas bases de dados e utilizando os refinamentos e para delimitar a trabalhos concisos com o tema em questão, foi possível a chegar em trabalhos que permitiram um estudo aprofundado e que serviram de base para a pesquisa em geral. Os principais artigos envolvem, na sua maioria, trabalhos de estado da arte. A busca teve como objetivo identificar os diferentes tipos de rastreadores solares, para que se pudesse realizar uma comparação e comprovação de que a proposta era de fato inovadora. Na Tabela 3 estão apresentados esses artigos.

Tabela 3 - Principais trabalhos utilizados para embasamento do estudo.

Autores	Título	Ano publicação
Hafez <i>et al.</i> ,	<i>Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review</i>	2018
Da rocha <i>et al.</i> ,	Classificação dos rastreadores solares: Uma breve revisão	2018
Sumathi <i>et al.</i> ,	<i>Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of methods adopted in recente decade</i>	2017
Prado <i>et al.</i> ,	Estado da Arte Em Mecanismos de Rastreamento Solar	2015
Mousazadeth <i>et al.</i> ,	<i>A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output</i>	2009

Fonte: Autor (2023).

4.3. As três metodologias adotadas

Devido aos resultados obtidos ao longo da pesquisa, foram adotadas três metodologias diferentes para comprovar a funcionalidade de mecanismo para rastreador solar passivo por meio de dilatação metálica. As três metodologias utilizadas são: mola em espiral, fio de bronze em formato helicoidal e lâmina bimetálica sob forma de termômetro.

4.4. Material utilizado

4.4.1. Materiais do experimento com a mola em espiral.

Os materiais escolhidos utilizados no mecanismo foram o aço, alumínio e o latão. Os motivos principais que levaram a sua escolha são de facilidade de encontrar no mercado e facilidade operacional deles. Outros fatores importantes foram seus coeficientes de dilatação, cujo valores são fundamentais para a proposta do mecanismo. Na Tabela 4 estão apresentados os coeficientes dos materiais escolhidos.

Tabela 4 - Coeficiente dos materiais escolhidos

Coeficiente de dilatação linear		Quantidade
Material	α ($^{\circ}\text{C}$)	Unidade (m)
Alumínio	$2,2 \times 10^{-5}$	1 chapa (2x1x0,5)
Latão	$1,8 \times 10^{-5}$	2 chapas (1,2x0,6x0,3)
Aço	$1,1 \times 10^{-5}$	1 chapa (1,2x1,15x0,43)

Fonte: Autor (2023),

Também foi utilizado um filme de poliéster leitoso de espessura de 0,35mm, onde este foi colocado entre as lâminas metálicas da espiral, se tornando uma espiral interna. Ele foi colocado para quando o material dilatasse, ele pudesse realizar um movimento de deslizamento por sua superfície, aumentando assim o resultado de deslocamento. Na Figura 14 está uma imagem do filme poliéster.

Figura 14 – Filme de poliéster leitoso.



Fonte: Autor (2023).

4.4.2. Materiais do experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.

O principal item deste experimento é o fio de bronze em formato helicoidal. Ela foi fornecida pela empresa Fabaraço, que está localizada no município de Igaratá. Ela atua na área de arames e molas para o estado de São Paulo. Na tabela 6 está o valor do coeficiente de

dilatação do bronze, o material da mola. Na Tabela 5 estão descritos o material utilizado e a quantidade neste experimento.

Tabela 5 - Coeficiente do material da mola utilizada.

Coeficiente de dilatação linear		Quantidade
Material	α ($^{\circ}\text{C}$)	Unidades (Voltas)
Bronze	$1,8 \times 10^{-5}$	1 mola (301)

Fonte: Autor (2023).

Também foram utilizados um tubo de cobre para conter o calor localizado na mola e uma barra vazada também de cobre para centralizar e transmitir o calor recebido ao longo da mola.

4.4.3. Materiais do experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.

O último experimento foi realizado com um termômetro bimetálico, que foi fabricado pela empresa Salvi Casagrande de acordo com as especificações feitas pelo autor. Ele foi escolhido pois dentro dele há uma mola em formato helicoidal bimetálico fabricada com invar e monel. Na Figura 15 é apresentada a fita bimetálica sob formato helicoidal.

Figura 15 – Lâmina bimetálica helicoidal geralmente utilizada para termômetro.



Fonte: Autor (2023)

Com isso, foi adquirido um termômetro maior. Seu visor tem 100 mm de diâmetro, sua haste tem 100 mm de comprimento, por consequência sua mola bimetálica é maior. A Figura

16 mostra o termômetro bimetalico.

Figura 16 – Lâmina bimetalica sob forma de termômetro.



Fonte: Autor (2023)

Também foi utilizado um transferidor de 180° para relacionar a temperatura alcançada com graus trigonométricos conforme a Figura 17.

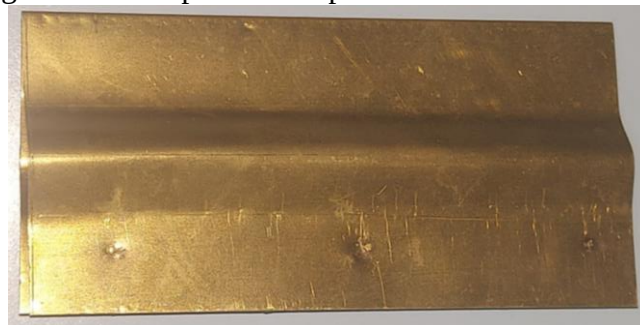
Figura 17 – Transferidor de 180°.



Fonte: Autor (2023).

Foram adaptadas duas chapas de latão para serem acopladas na haste deste termômetro bimetalico. Na Figura 18 está uma chapa com a coloração natural.

Figura 18 – Chapa de latão para a haste do termômetro.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 19 está outra chapa de latão pintada de preto fosco adaptada para ser acoplada a haste do termômetro.

Figura 19 – Chapa de latão pintada de preto fosco para acoplar a haste do termômetro.



Fonte: Autor (2023).

Também foi utilizado um frasco de vidro comum com capacidade de um litro para causar um efeito estufa na haste do termômetro. Na Figura 20 está a sua imagem.

Figura 20 – Frasco de vidro comum com capacidade de um litro.



Fonte: Autor (2023).

4.5. Definição das estruturas

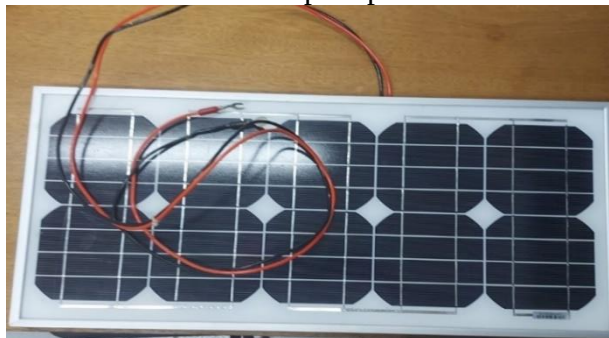
Os experimentos foram realizados com a espiral metálica feita de latão, a espiral helicoidal no formato de mola feita de bronze e uma espiral de fita bimetálica feita de invar e monel.

4.5.1. Experimento com a espiral metálica.

Para definição da estrutura foi levado em consideração as suas possíveis aplicações, ou

seja, onde será seu campo de atuação. O sistema inicial é designado para diversas aplicações e pode ser utilizado com um painel fotovoltaico. As dimensões do painel são de 68 cm x 34 cm. A Figura 21 apresenta o painel fotovoltaico.

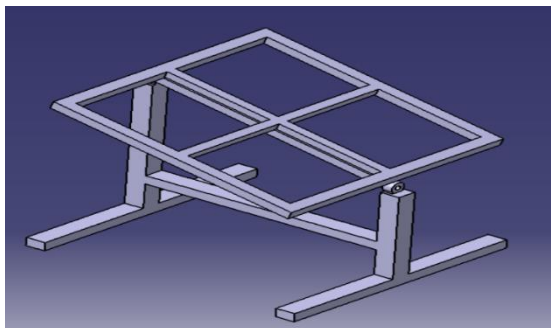
Figura 21 - Painel fotovoltaico utilizado para padronizar as dimensões da estrutura



Fonte: Autor (2023).

Com este painel foram definidas as dimensões da estrutura. Foi realizada um projeto no *software* Catia 3D da estrutura adequada para receber tanto o mecanismo da espiral como o painel selecionado. A Figura 22 apresenta o projeto da estrutura.

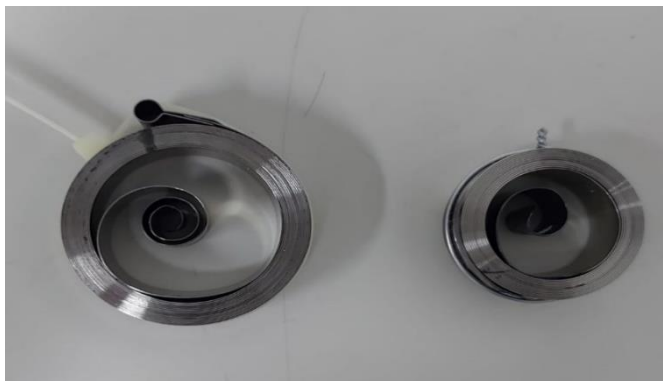
Figura 22 – Projeto da estrutura para estudo do rastreador solar



Fonte: Autor (2023).

O primeiro material utilizado em forma de espiral foi o latão. Para definição da espiral foi selecionado uma corda de relógio de parede. A largura de 20 mm da corda foi adotada para a espiral metálica. A Figura 23, são as cordas de relógios utilizadas como base de dimensões para as espirais.

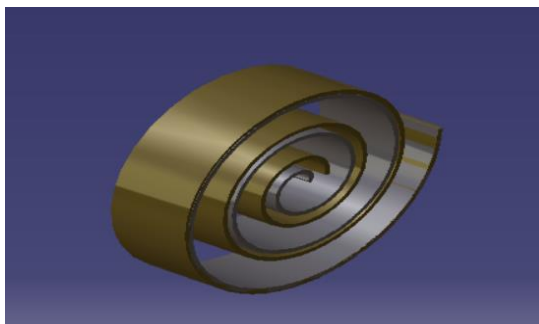
Figura 23 - Cordas de relógio utilizadas para se obter as dimensões das espirais



Fonte: Autor (2023).

Com as dimensões adotadas foi realizada uma projeção da espiral no *software* Catia 3D. A Figura 24 apresenta essa projeção.

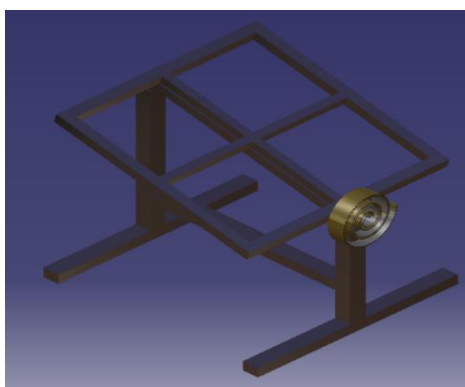
Figura 24 - Projeção da espiral em vista 3D.



Fonte: Autor (2023).

Com os desenhos dos equipamentos houve uma projeção para a montagem da espiral na estrutura. A Figura 25 é a projeção final desta montagem

Figura 25 - Projeção da montagem da espiral na estrutura



Fonte: Autor (2023).

Para a fabricação da primeira espiral, que seria de latão, as chapas obtidas foram cortadas em tiras, com largura de 20 mm. Logo após, elas foram soldadas e enroladas a um eixo, o que resultou em um espiral de 50 m de comprimento com inicialmente um raio de 100mm. Logo após, o filme poliéster também foi cortado em tiras com a mesma largura e colado para se tornar uma espiral interna a metálica, assim, resultando em espiral com um raio de 120mm.

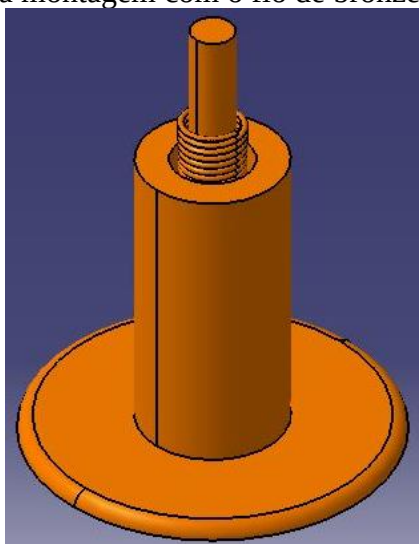
4.5.2. Experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.

Para potencializar a dilatação do fio de bronze em formato helicoidal, foi pensado em colocar uma barra por dentro dela, fazendo com que essa barra ficasse envolvida pela mola. Além disso, era necessário ter um ponto fixo da mola, uma das pontas seria soldada em uma base para que a dilatação ocorresse no outro sentido.

Por último, seria colocado um tubo de bronze externo para se manter a temperatura no fio de bronze.

Foi realizado um desenho 3D para se ter uma projeção final da estrutura. Na Figura 26 está a sua projeção 3D, sem cotas inicialmente, apenas para visualização de como deveria ser feito a montagem dos componentes.

Figura 26 - Projeção da montagem com o fio de bronze em formato helicoidal.



Fonte: Autor (2023).

4.5.3. Experimento utilizando a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.

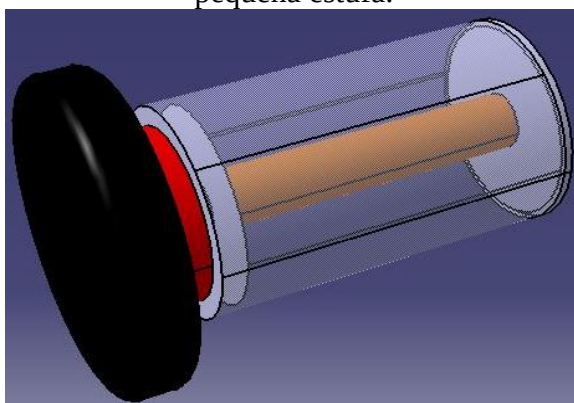
Para potencializar o ganho de temperatura na haste do termômetro bimetálico, ele seria submetido inicialmente a adição de duas chapas de latão, uma na cor natural e uma na cor enegrecida. Logo após, irá ser acoplado um vidro comum para reproduzir um efeito estufa na

haste.

Por último será adicionado uma pequena parte de uma célula fotovoltaica para verificar o possível deslocamento de uma massa por meio da dilatação metálica.

Na Figura 27 está apresentada projeção 3D como ficaria a estufa com o termômetro bimetálico.

Figura 27 - Projeção da montagem da lâmina bimetálica sob forma de termômetro com uma pequena estufa.



Fonte: Autor (2023).

4.6. Equipamentos

Os equipamentos utilizados para medição foram:

- um inclinômetro simples para que registrar a inclinação da estrutura ao longo do dia
- um termômetro infravermelho para medir a temperatura nos experimentos
- um medidor portátil de radiação solar e
- um inclinômetro digital para posicionar a termômetro bimetálico na angulação correta.

O inclinômetro utilizado de base magnética foi utilizado na pesquisa para registrar a variação angular da estrutura, em graus trigonométricos, em torno do eixo durante as horas de maior incidência solar (9h00 às 14h00). Ele seria usado apenas no experimento com a espiral. Este dispositivo ainda contém como adendo uma tabela de conversão de ângulos em sua parte traseira. A Figura 28 está a foto do equipamento.

Figura 28 – Inclínômetro simples



Fonte: Autor (2023).

O termômetro infravermelho *Raytek* foi o equipamento para a medida da temperatura, em graus celsius, nos materiais metálicos. Ele foi usado em todos os experimentos realizados na pesquisa. Ele foi usado para medir a temperatura da chapa enegrecida e da chapa com sua coloração natural. A Figura 29 apresenta o termômetro infravermelho utilizado no estudo.

Figura 29 – Termômetro infravermelho.



Fonte: Autor (2023).

Outro equipamento utilizado foi o medidor de energia solar MÊS-100. Ele foi usado nos experimentos para registrar a radiação solar em watts por metro quadrado. A Figura 30 apresenta o medidor de energia utilizado no estudo.

Figura 30 – Medidor de energia solar MES-100



Fonte: Autor (2023).

O último equipamento utilizado foi o inclinômetro digital. Ele foi utilizado apenas no último experimento para aproximar o termômetro bimetálico da angulação de 33 °.

Na Figura 31 está uma imagem do inclinômetro digital.

Figura 31 – Inclinômetro digital.



Fonte: Autor (2023).

4.7. Experimentos com as espirais metálicas.

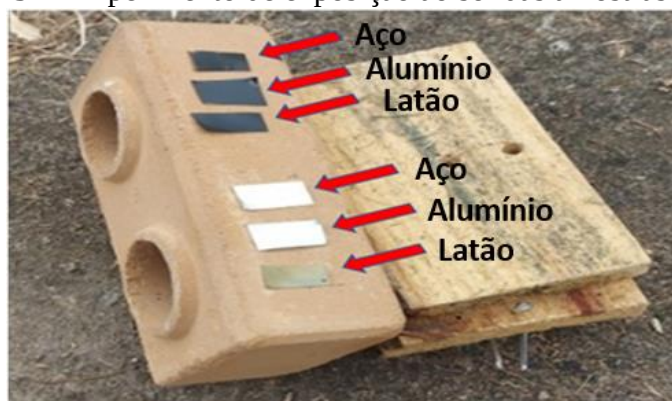
O primeiro experimento realizado foi a exposição direta das espirais juntamente com a estrutura sob a luz solar para que se obtivesse a dilatação das lâminas metálicas ao longo do dia.

A espiral foi exposta a luz solar de forma a obter movimento circular e determinar o ângulo de giro sobre seu próprio eixo.

4.7.1. Experimento com as amostras dos materiais pintados de preto fosco e de cor natural.

Inicialmente foi realizado um teste onde foi pintado de preto fosco amostras dos três materiais escolhidos e expô-los a luz solar juntamente as amostras dos que não receberam pintura. Este experimento teve como objetivo verificar se o material pintado de preto fosco iria absorver mais energia solar e por consequência atingir maiores temperaturas. Os equipamentos de medição utilizados neste experimento foram o termômetro infravermelho e o medidor solar portátil. Foi registrado durante dez dias, das 9hrs às 14hr os valores obtidos. A Figura 32 apresenta os três materiais utilizados, com três deles pintados de preto fosco.

Figura 32 - Experimento de exposição ao sol das amostras dos materiais



Fonte: Autor (2023).

Com esse experimento, as tabelas do Apêndice A1 construídas.

De início, foi levantado a maior variação de temperatura das amostras de latão, pois era o material disponível para construir a primeira espiral metálica. Consultando estas tabelas e verificando os valores das amostras não pintadas, e calculando a maior variação de temperatura, que é o valor medido subtraído do valor da temperatura ambiente no horário, o maior valor encontrado foi de 25,4 °C.

Com este valor e sabendo que a espiral de latão possui 50 m de comprimento, foi possível calcular a dilatação linear que poderia ser obtido a exposição solar, por meio da Equação 1, a equação de dilatação linear.

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta \theta \quad (1)$$

$$\Delta L = 50000 * 1,8 \times 10^{-5} * 25,4 = 22,86 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 22,86 \text{ mm}$$

O que resulta em possível dilatação de 22,86 mm. Utilizando a Equação 2, descrita abaixo, que é a equação da circunferência, utilizando o diâmetro obtido da espiral podemos chegar ao valor da sua circunferência.

$$C = \pi * d \quad (2)$$

$$C = \pi * 240 \text{ mm} = 753,982 \text{ mm}$$

Dividindo este valor pela dilatação, obtém o número de dilatações que poderá ocorrer ao longo da circunferência, representado pela letra x. Utiliza-se a Equação 3.

$$X = C / \Delta L \quad (3)$$

$$X = 753,982 / 22,86 = 32,98$$

E dividindo este valor por 360°, que representa uma volta completa, podemos chegar ao valor da angulação poderá alcançar. Utiliza-se aqui a Equação 4.

$$\text{Angulação} = 360 / X \quad (4)$$

$$\text{Angulação} = 360 / 32,98 = 10,91^\circ$$

Já com as amostras de pintada de preto o maior valor de diferencial de temperatura encontrado foi o de 30,6 ° C, utilizando se as equações de 1 a 4 encontrou se os valores de ΔL igual a 27,54 mm, C igual a 753,982 mm, X igual a 27,38 e a provável angulação é de 13,15 °.

Então, estas eram as angulações esperadas no movimento do eixo da estrutura, sendo 10,91 ° para uma espiral em cor natural e 13,15 ° para uma espiral enegrecida.

4.8. Experimento com o fio de bronze no formato helicoidal.

O segundo experimento foi fabricar uma mola helicoidal de bronze com diâmetro de 20 mm com um comprimento total de 18,91 m e 301 voltas. O material foi fornecido pela empresa Fabaraço, que está localizada em Igaratá.

Supondo que seria possível alcançar um diferencial de temperatura de 40 °C num dia ensolarado, foi possível aplicar os mesmos conceitos utilizados no experimento com a espiral.

Novamente utilizando as equações de 1 a 4, pode se calcular a dilatação esperada pela mola. Sendo o ΔL igual a 13,62 mm, C igual 62,83, X igual 4,61 e a angulação provável de 78,09 °.

A helicoidal de bronze fosforoso foi submetida a exposição solar para se verificar se haveria deslocamento.

Ela também foi submetida a um experimento onde foi despejado água quente, aproximadamente a 100° C.

4.9. Experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.

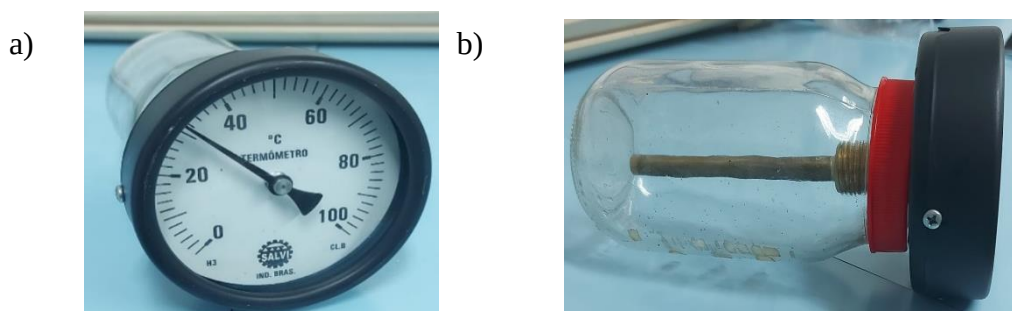
Foi pesquisado no mercado a disponibilidade de fornecimento de um par bimetálico, constituído de invar e monel, que são os materiais comumente utilizados em lâminas bimetálicas.

No entanto, não foi encontrado em grande escala, ou tamanhos maiores. O dispositivo encontrado no mercado que possui este material bimetálico é um termômetro bimetálico utilizado para medir temperatura. Com isso, foi especificado um destes termômetros bimetálicos, que tivesse 100 mm diâmetro de visor e uma haste de também 100 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro.

Ele possui internamente uma lâmina bimetálica em formato helicoidal que desloca o seu ponteiro por meio de dilatação. Sua escala varia de 0 °C á 100 °C, o que relacionando a graus trigonométricos é 270 °, ou $\frac{3}{4}$ de uma volta completa.

Acoplando o vidro a haste do termômetro, foi possível a construção de uma pequena estufa nela para que haja um aumento de ganho de temperatura. Além disso, era possível acoplar duas pequenas chapas metálicas, uma enegrecida e outra de cor natural para que houvesse maior ganho de calor. Na Figura 33 a-vista frontal, b-vista lateral está a imagem do termômetro com vidro comum.

Figura 33 – Estrutura construída para gerar uma estufa no termômetro bimetálico.



Fonte: Autor (2023).

O terceiro experimento consistiu em expor a lâmina bimetálica sob forma de termômetro, ao sol em diferentes situações, acoplado com um transferidor, para verificar quais máximas temperaturas poderiam alcançar, que resultaria nos valores dos possíveis ângulos trigonométricos. Ele foi posicionado a aproximadamente uma angulação de 33°, pois é angulação padrão dos painéis fotovoltaicos para Guaratinguetá. Na Figura 34 está ilustrado esse posicionamento.

Figura 34 – Posicionamento do termômetro bimetalico a 33°.



Fonte: Autor (2023).

Para aumentar o ganho de temperatura foram testadas diferentes situações. A primeira foi a haste exposta diretamente ao sol. A segunda foi dentro de um vidro. A terceira foi acoplada uma chapa de latão de cor natural. A quarta foi dentro do um vidro com a chapa de latão de cor natural. A quinta foi com uma chapa de latão enegrecida. A sexta foi dentro do vidro com uma chapa de latão enegrecida. Cada situação teve uma repetição acima de cinco vezes.

A primeira situação, foi lâmina bimetalica sob forma de termômetro sozinha como está na Figura 35 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal.

Figura 35 – Primeira situação de exposição da lâmina bimetalica sob forma de termômetro



a)



b)

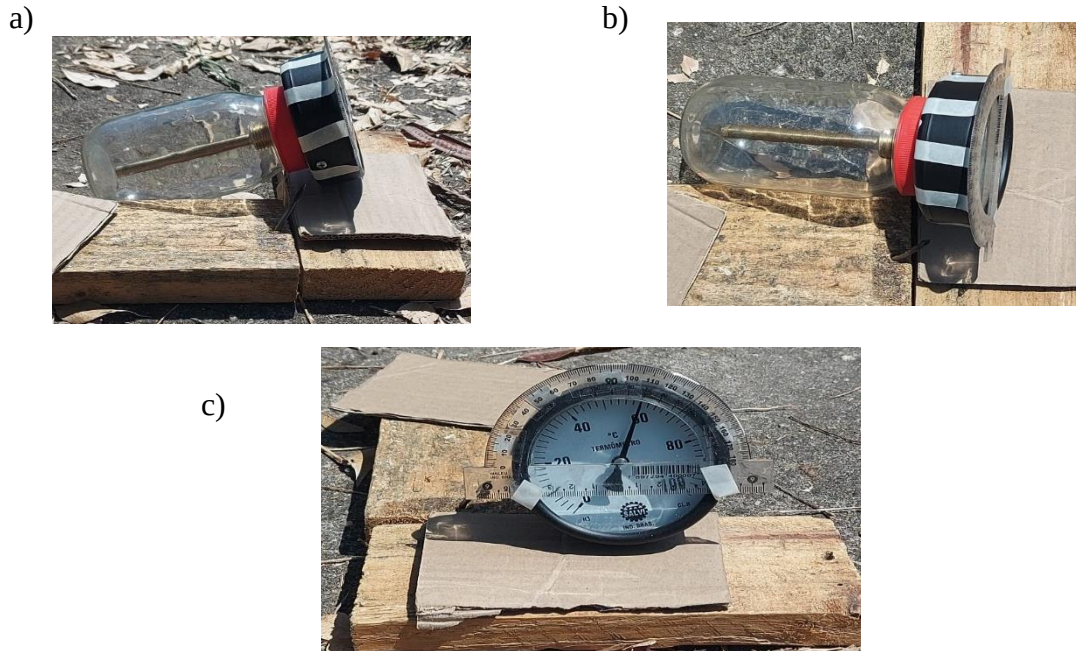
c)



Fonte: Autor (2023).

A segunda situação, foi lâmina bimetalica sob forma de termômetro dentro do vidro como está na Figura 36 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal.

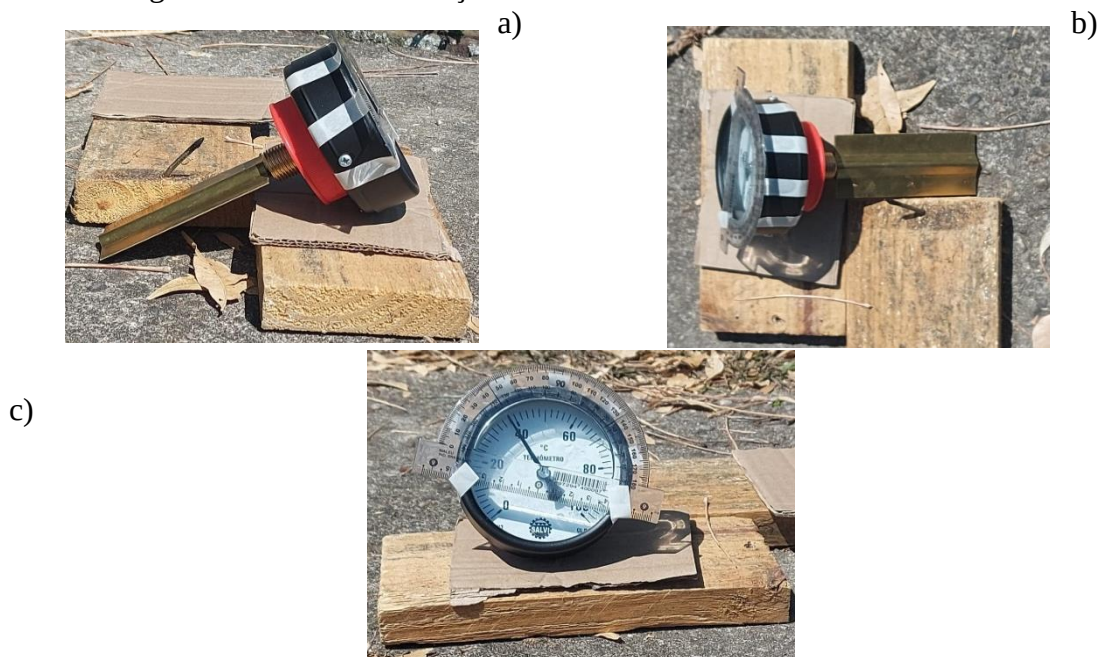
Figura 36 – Segunda situação de exposição da lâmina bimetalica sob forma de termômetro



Fonte: Autor (2023).

A terceira situação, foi lâmina bimetalica sob forma de termômetro com chapa de latão na cor natural como está na Figura 46 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal.

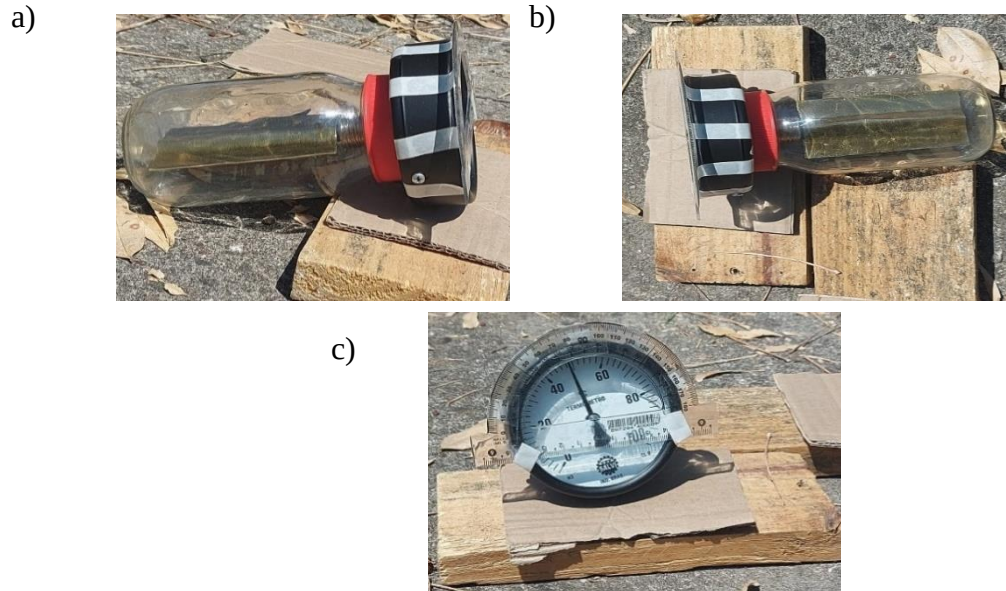
Figura 37 – Terceira situação da lâmina bimetalica sob forma de termômetro



Fonte: Autor (2023).

A quarta situação, foi lâmina bimetálica sob forma de termômetro dentro do vidro com a chapa de latão na cor natural como está na Figura 38 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal.

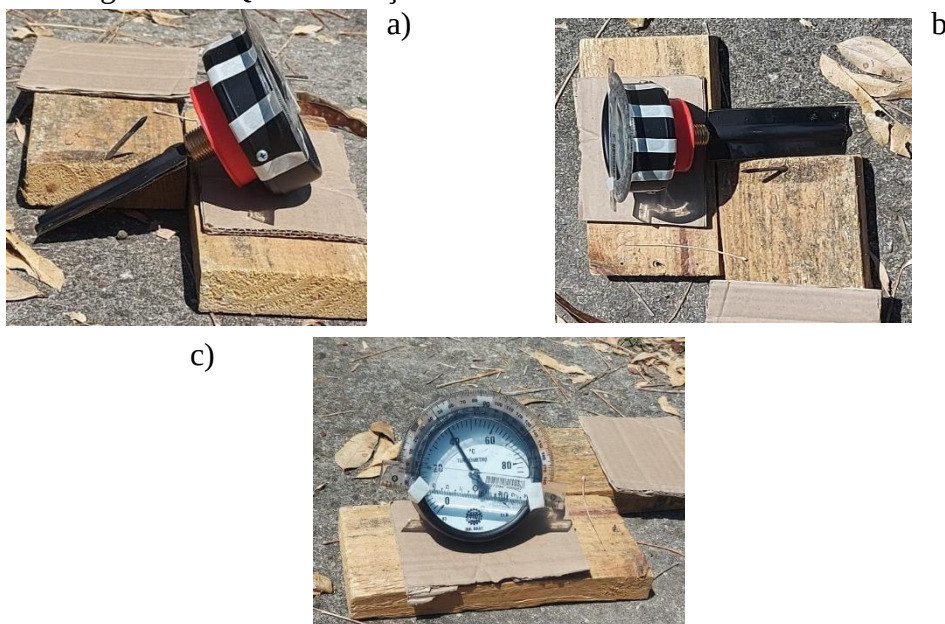
Figura 38 – Quarta situação da lâmina bimetálica sob forma de termômetro



Fonte: Autor (2023).

A quinta situação, foi lâmina bimetálica sob forma de termômetro com chapa de latão enegrecido como está na Figura 39 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal.

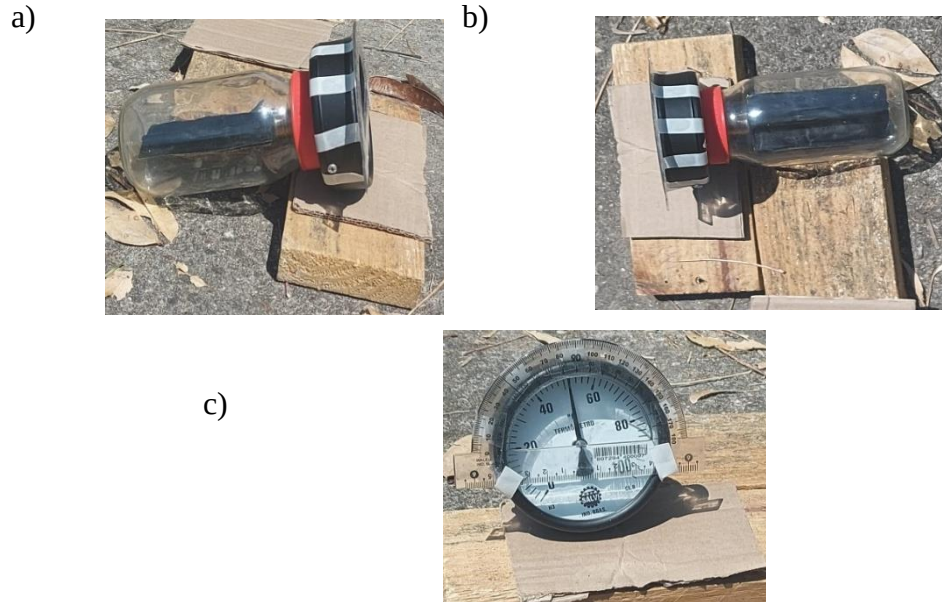
Figura 39 – Quinta situação da lâmina bimetálica sob forma de termômetro



Fonte: Autor (2023).

A sexta situação, foi lâmina bimetálica sob forma de termômetro dentro do vidro com chapa de latão enegrecido como está na Figura 40 a- vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal

Figura 40 – Sexta situação de exposição da lâmina bimetálica sob forma de termômetro

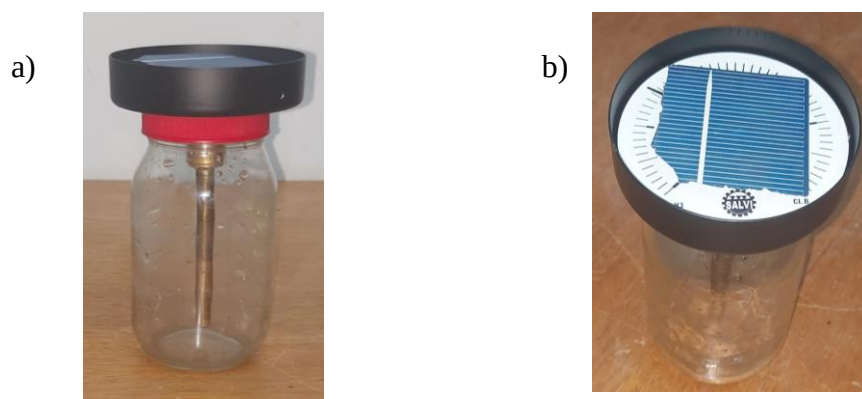


Fonte: Autor (2023).

Também foi colocado uma amostra de célula fotovoltaica para verificar o quanto de massa o material bimetálico helicoidal poderá girar sobre seu próprio eixo.

A Figura 41 a-visão lateral b-visão superior está demonstrado como ficou à disposição do pedaço de célula fotovoltaica na lâmina bimetálica sob forma de termômetro.

Figura 41 – Lâmina bimetálica sob forma de termômetro com um pedaço de célula fotovoltaica acoplada.



Fonte: Autor (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos experimentos realizados com a espiral metálica feita de latão, a espiral helicoidal no formato de mola feita de bronze e uma espiral de fita bimetálica feita de invar e monel são apresentados nesse capítulo.

5.1. Experimentos realizados.

5.1.1. Experimento com espirais

A exposição das amostras metálicas dos três materiais, tanto as pintadas da cor preto e as de cor natural, resultou em dez tabelas, referente aos 10 dias de exposição. Elas estão contidas no apêndice A.

Com as tabelas do apêndice A1 (Tabelas 8 a 17, págs 69 a 78), foi construída a Tabela 6, que representa a média dos valores registrados.

Tabela 6– Média dos valores registrados das amostras metálicas

	Temperatura Ambiente °C	Aço °C		Alumínio °C		Latão °C		Radiação W/m ²	Umidade %
		Cor natural	Tinta preta	Cor natural	Tinta preta	Cor natural	Tinta preta		
Dia 1	19,27	29,66	36,39	29,06	34,53	27,89	35,10	646,84	60,82
Dia 2	21,00	32,58	40,75	33,83	41,30	33,20	41,08	755,00	55,55
Dia 3	22,09	35,13	42,25	35,05	41,90	36,41	42,96	822,11	53,00
Dia 4	23,09	32,51	39,25	32,90	39,62	32,31	37,76	784,29	53,40
Dia 5	19,73	20,36	28,23	21,32	28,50	25,29	27,92	372,25	63,09
Dia 6	25,00	33,81	42,89	31,42	41,12	34,81	41,69	649,28	56,18
Dia 7	24,82	34,52	41,06	33,06	39,65	35,22	39,99	629,81	57,09
Dia 8	24,00	34,03	41,85	33,62	41,54	36,58	41,49	753,42	55,18
Dia 9	20,82	27,59	38,94	29,73	39,00	31,99	39,24	628,06	60,55
Dia 10	22,38	31,58	39,08	31,28	38,52	32,71	38,50	676,63	56,79

Fonte: Autor (2023).

Analisando a Tabela 7 dos valores ao longo dos dez dias, é possível visualizar que o resultado obtido é de que as amostras pintadas de preto fosco sempre alcançaram maiores temperaturas e as de cor natural sempre demonstraram as menores temperaturas entre os materiais. Esse resultado constante ao longo dos dias resultou na adoção da pintura do material final da espiral metálica para que assim houvesse uma maior incidência solar que resultaria em uma maior variação de temperatura.

Com o experimento das amostras realizado, foi construída a estrutura final. O material utilizado foi o de *metalon*, devido ao baixo custo e disponibilidade do material. A Figura 42 a-

vista lateral, b-vista superior e c-vista frontal apresenta a estrutura final com os ajustes de projeto.

Figura 42 – Vistas da estrutura final de *metalon* que será utilizado para teste da espiral metálica.



Fonte: Autor (2023).

O comprimento da fita metálica, utilizando o latão, para a espiral enrolada é de 50 m. A largura da fita metálica é de 20 mm e sua espessura é de 0,3 mm. O raio adquirido da espiral ao enrolar este material e colocar o filme de poliéster por dentro da espiral foi de 120 mm. A dilatação linear dessa espiral de latão, utilizado a Equação 1 sob a variação de temperatura de 30,6 °C com a chapa enegrecida, esperada era de 22,7 mm para o comprimento 50 m.

A Figura 43 apresenta a espiral fabricada com latão.

Figura 43 - Espiral construída com a fita de latão (liga com 60% de cobre + 40% de zinco)



Fonte: Autor (2023).

Com o padrão definido da espiral fabricou-se outra com fita de aço. O comprimento foi de 60 m. A largura da fita metálica é de 20 mm e sua espessura é de 0,43 mm. A dilatação do aço é bem menor e iria gerar uma dilatação menor. O raio adquirido da espiral ao enrolar este

material foi de 10 cm. A espiral de aço também não apresentou deslocamento. A Figura 44 apresenta a espiral fabricada com fita de aço.

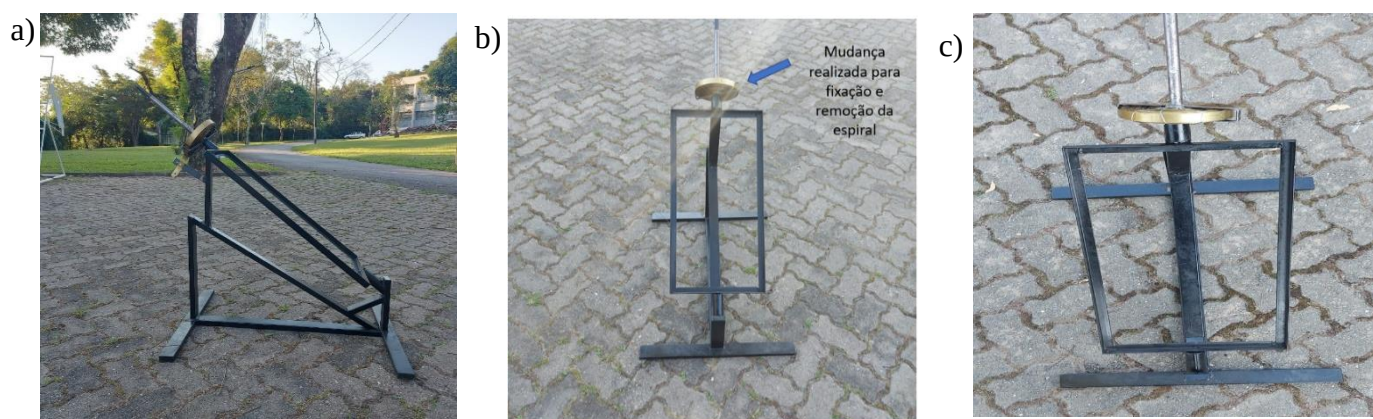
Figura 44 - Espiral construída com o material aço (liga com 98,5% de ferro + 0,5 % de carbono e sílico, enxofre e fosforo).



Fonte: Autor (2023).

Tendo a projeção realizada, foi colocada em prática a construção final da estrutura. A Figura 45 a- vista lateral, b-vista frontal e c-vista superior, é uma foto da estrutura com a espiral de latão fixada em sua posição escolhida.

Figura 45 – Estrutura do rastreador solar em latão



Fonte: Autor (2023).

A angulação esperada era de 13,15°. No funcionamento final, não houve deslocamento, mesmo utilizando o filme de poliéster para que a chapa metálica deslizasse sobre ele. Isso se deve ao fato de a disposição estar incorreta, com isso a dilatação ocorre, mas há um efeito de enrugamento por toda a espiral fazendo com que não seja possível visualiza – lá na parte final da espiral e assim não há deslocamento no eixo. Mesmo não tendo realizado um deslocamento

físico visível, é possível se calcular quanto material seria necessário para deslocar certos ângulos.

5.1.2. Experimento com o fio de bronze em formato helicoidal.

Esse experimento com o fio de bronze foi receber calor e ter uma estrutura que permitisse manter o calor ao longo dela, para isso foram utilizadas barras de bronze internamente e externamente ao fio de bronze em formato helicoidal. A barra vazada de bronze foi colocada na parte interior do fio de bronze. Na Figura 46 podemos ver essa junção.

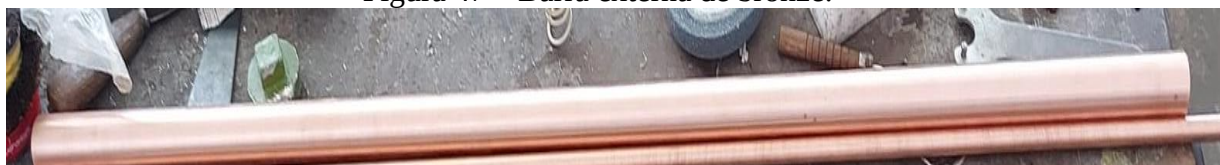
Figura 46 – Barra vazada inserida dentro da mola de bronze.



Fonte: Autor (2023).

Após isso, elas foram soldadas em uma base improvisada apenas alocar elas. E logo após foi soldado um tubo de bronze por fora, envolvendo a mola, com a intenção de conter o calor recebido. A Figura 47 apresenta o tubo de bronze citado.

Figura 47 – Barra externa de bronze.



Fonte: Autor (2023).

Após a realização das devidas soldas e do posicionamento correto da barra e do tubo de bronze juntamente com a mola de bronze, foi possível finalizar a construção da estrutura deste experimento. A helicoidal de bronze fosforoso foi exposta ao sol para se observar se havia deslocamento. Na Figura 48 está demonstrada a estrutura construída.

Figura 48 – Estrutura construída para o fio de bronze em formato helicoidal.



Fonte: Autor (2023).

A angulação esperada com a dilatação da mola de bronze fosforoso era de $78,09^\circ$. Após a realização do experimento não foi possível visualizar nenhum deslocamento da espiral em sua parte final. Isso ocorreu, pois, a dilatação esperada que ocorreria a cada volta, acontece no sentido radial e não no sentido longitudinal. Assim no formato helicoidal não houve a dilatação esperada na última volta para gerar a angulação de $78,09^\circ$.

Após isso, foi realizado um experimento com despejo de água fervente, com a temperatura aproximadamente a 98°C para verificar se haveria algum deslocamento na mola helicoidal e mesmo assim, não houve resultado visível.

5.1.3. Experimento com a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro.

Neste experimento, a lâmina bimetálica sob forma de termômetro foi exposta a seis situações diferentes para verificar se haveria uma significativa variação de temperatura e por consequência variação trigonométrica.

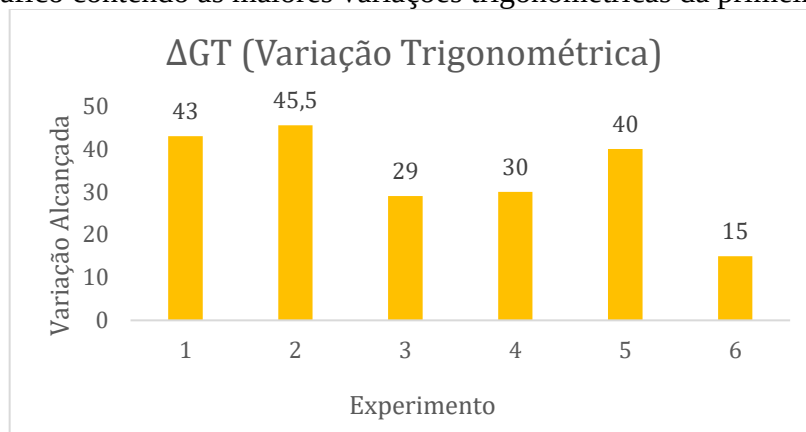
As situações que ela foi exposta são:

- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro sozinha
- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro dentro do vidro
- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro com chapa de latão na cor natural
- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro dentro do vidro com a chapa de latão na cor natural
- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro com chapa de latão enegrecida
- Lâmina bimetálica sob forma de termômetro dentro do vidro com chapa de latão enegrecida.

Cada situação resultou em uma tabela e todas elas são apresentadas no apêndice A2.

A Figura 49 (Tabela 18, apêndice A2, pág. 79) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento na primeira situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de $45,5^\circ$ com uma radiação solar de $898,3 \text{ W/m}^2$. E o menor ΔGT foi de 15° com uma radiação solar de $227,5 \text{ W/m}^2$.

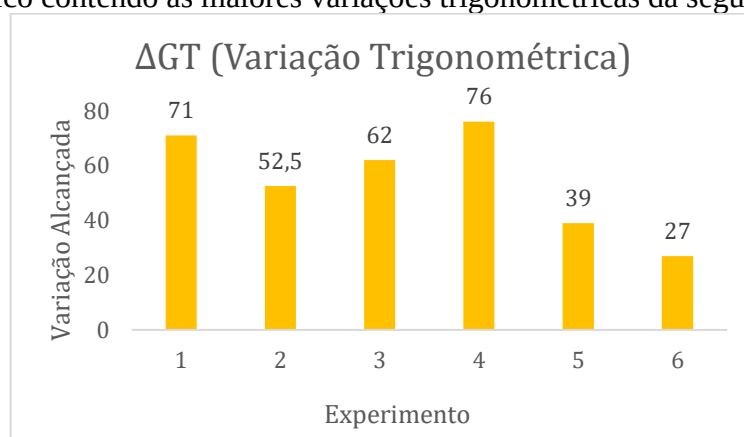
Figura 49 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da primeira situação.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 50 (Tabela 19, apêndice A2, pág. 79) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento na segunda situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de 76° com uma radiação solar de $817,3 \text{ W/m}^2$. E o menor ΔGT foi de 27° com uma radiação solar de $229,8 \text{ W/m}^2$.

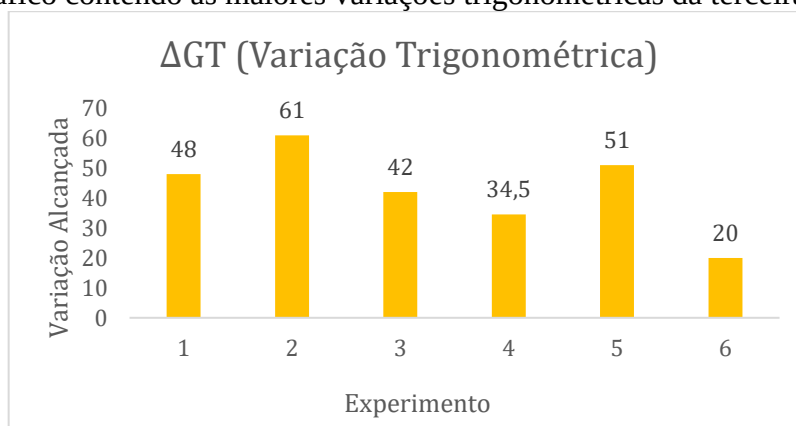
Figura 50 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da segunda situação.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 51 (Tabela 20, apêndice A2, pág. 80) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento na terceira situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de 61° com uma radiação solar de $872,2 \text{ W/m}^2$. E o menor ΔGT foi de 20° com uma radiação solar de 224 W/m^2 .

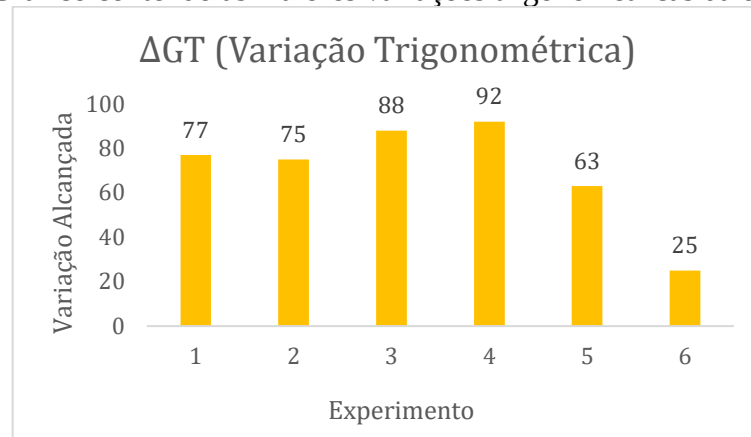
Figura 51 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da terceira situação.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 52 (Tabela 21, apêndice A2, pág. 80) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento na quarta situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de 92° com uma radiação solar de $823,7 \text{ W/m}^2$. E o menor ΔGT foi de 25° com uma radiação solar de $140,5 \text{ W/m}^2$.

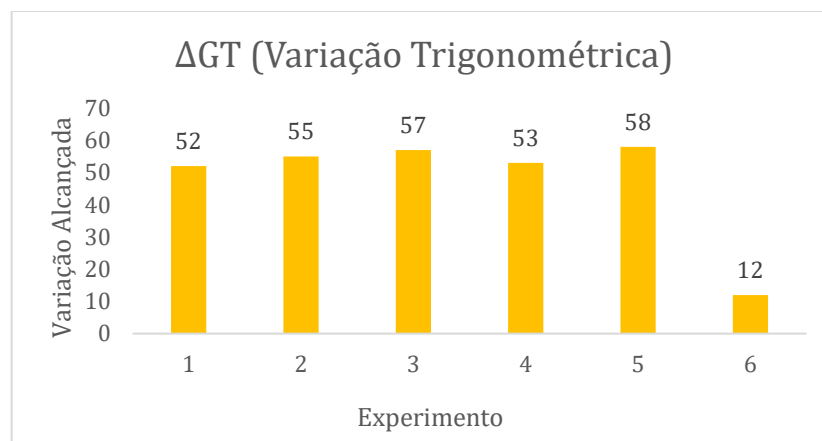
Figura 52 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da quarta situação.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 53 (Tabela 21, apêndice A2, pág. 81) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento quinta situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de 58 ° com uma radiação solar de 826,7 W/m². E o menor ΔGT foi de 12 ° com uma radiação solar de 223,1 W/m².

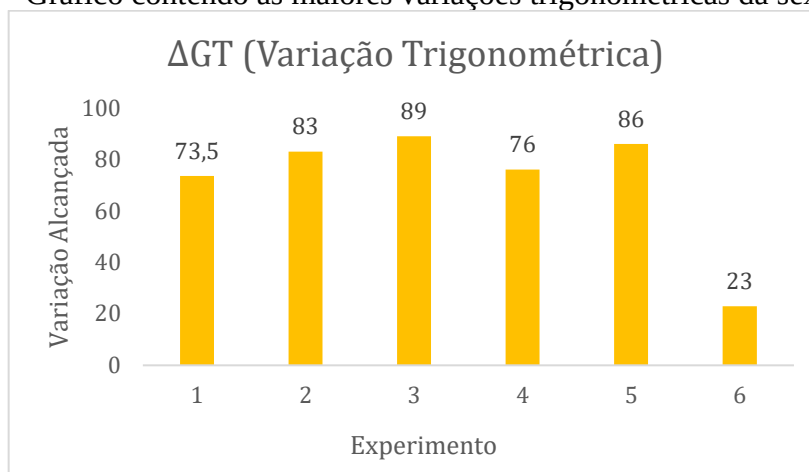
Figura 53 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da quinta situação.



Fonte: Autor (2023).

A Figura 54 (Tabela 22, apêndice A2, pág. 81) apresenta o gráfico de variação trigonométrica alcançada versus experimento na sexta situação. A maior variação de ΔGT (variação de ângulo trigonométrico) registrado foi de 89 ° com uma radiação solar de 818,6 W/m². E o menor ΔGT foi de 23 ° com uma radiação solar de 210,3 W/m².

Figura 54 – Gráfico contendo as maiores variações trigonométricas da sexta situação.



Fonte: Autor (2023).

A situação que apresentou a maior variação trigonométrica foi a quarta, que era a lâmina bimetalica sob forma de termômetro dentro do vidro com a chapa de latão na cor natural. Os valores obtidos nela foram de 92 ° de variação trigonométrica a 823,7 W/m²

A situação que apresentou a maior variação trigonométrica para pouca radiação solar foi a segunda, que era a lâmina bimetalica sob forma de termômetro dentro do vidro. Os valores obtidos nela foram de 27 ° a 229,8 W/m².

Após esses experimentos foi colocada um pedaço de célula fotovoltaica em cima do ponteiro com peso igual 1,8 g para verificar o deslocamento com a variação de temperatura.

Com isso foi possível verificar que uma lâmina bimetalica projetada para um termômetro com uma haste de 100 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro é possível deslocar um objeto de 1,8 g, o que poderia ser dimensionando para outras massas.

6. CONCLUSÕES

Analisando as referências bibliográficas, principalmente os reviews sobre os rastreadores solares, a proposta de rastreador passivo com dilatação metálica apresentada trata de um sistema inovador no mercado.

Os experimentos dependem de maior variação da temperatura para que haja uma rotação na estrutura de suporte por meio da dilatação térmica.

Os materiais pintados de preto fosco alcançaram maiores temperaturas e podem ser adotados.

Não foi possível desenvolver um mecanismo com a espiral metálica de latão, pois a dilatação linear que ocorre nela, ocasiona num enrugamento, fazendo com que não haja uma dilatação na parte final da espiral e por consequência não desloque o eixo.

Não foi possível verificar a dilatação em um fio de bronze em formato helicoidal pois a dilatação ocorre de forma radial e não longitudinal, não realizando o giro esperado na última volta. O que foi observado deste experimento também é que a rigidez e diâmetro afetaram também o processo de dilatação longitudinal deste material.

A lâmina bimetálica sob forma de termômetro foi a que apresentou os melhores resultados com a variação de temperatura, o que permitiu uma variação trigonométrica maior. Para o final dos experimentos, a lâmina metálica do termômetro especificado, conseguiu mover uma massa de 1,8 g, o que pode se concluir que a lâmina bimetálica com maiores dimensões geométricas será possível deslocar massas maiores, como um painel fotovoltaico.

Com os deslocamentos registrados por meio da lâmina bimetálica, é possível destinar este mecanismo a aplicações como painéis fotovoltaicos, aquecedor solar de água, aquecedor para secagem de folhas e secagem de frutas.

7. TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros são a análise de fitas metálicas de dimensões geométricas maiores para resultar na dilatação linear esperada. Disposição dela de uma maneira que mecanicamente ela possa se movimentar corretamente.

Estudar diferentes diâmetros de fio de bronze e diferentes coeficientes de rigidez para verificar a relação entre a variação de temperatura e dilatação obtida.

Uso do lâminas bimetálicas de invar e monel em maiores dimensões geométricas para movimentar materiais de massas maiores.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANI-IDRISSI, M. A. *et al.* Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 119, p. 79–94, apr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117311734>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- ABDUNNABI, M. *et al.* Flat plate based-solar system with a tracking system. **Solar energy and sustainable development journal**, Tripoli, v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: <https://jsesd-ojs.csers.ly/ojs/index.php/jsesd/article/view/36>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- ARAÚJO SOBRINHO, A.; SOUZA, G. **Física térmica: teórica e experimental**. Natal: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Rio Grande do Norte, 2006. Disponível em: <https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1038>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- BRITO, M. C. *et al.* Passive solar tracker based in the differential thermal expansion of vertical strips. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, Melville, v. 11, n. 4, 2019. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jrse/article-abstract/11/4/043701/281023/Passive-solar-tracker-based-in-the-differential?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- CARNEIRO, A. **Ensino de física por investigação: uma proposta para ensino de dilatação térmica dos sólidos para alunos do ensino médio**. 2019. Dissertação (Mestrado nacional profissional em ensino de física) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
- CASCAES, B. P. **Avaliação de oportunidades do uso de energia solar térmica em aplicações industriais no Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- CAVALCANTE, M. *et al.* Os impactos da tecnologia de energia solar On-Grid e Off-Grid para o meio ambiente e seus aspectos positivos. **e-Acadêmica**, Vargem Grande Paulista, v. 3, n. 3, 2022. Disponível em: <https://eacademica.org/eacademica/article/view/382>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- CREMASCO, N. P. *et al.* Estudo de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Curitiba, v. 12, n. 32, 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/view/015052>. Acesso em: 11 nov. 2023.
- FLECHER, N. R. C. **Custos ambientais das emissões atmosféricas na geração de energia elétrica: uma proposta para o setor energético nacional**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2022.
- FREITAS, R. **Aplicações do cálculo diferencial e integral: temperatura, calor e dilatação térmica**. 2021. Dissertação (Mestrado profissional em matemática em Rede Nacional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2021.
- GÉLIO, L. G.; CÉSAR, F. I. G. Energia solar: um estudo sobre o futuro da geração de

energia. **Acertte**, Jundiaí, v.1, n. 5, 2021. Disponível em: <https://acertte.org/index.php/acertte/article/view/34>. Acesso: 11 nov. 2023.

HAFEZ, A. Z. *et al.* Solar tracking systems: technologies and trackers drive types: a review **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 91 p. 754-782, aug. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118301886>. Acesso em: 11 nov. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA. **Renewable's information: Overview 2019**. Paris, 2019.

MOREIRA, D. C. *et al.* Comparative study of maximum power point tracking techniques in photovoltaic arrays. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 14–20, 2022. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v14n1a04.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2023.

MOURAD, A. H. I. *et al.* A state-of-the-art review: solar trackers. *In: ADVANCES IN SCIENCE AND ENGINEERING TECHNOLOGY INTERNATIONAL CONFERENCES, ASET, 2022, Dubai. Proceedings [...]*. Dubai: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9734305/proceeding>. Acesso em: 08 dez. 2023.

MUSSI, R. *et al.* Pesquisa quantitativa e/ou qualitativa: distanciamentos, aproximações e possibilidades. **Sustinere**, Rio de Janeiro, v.7, n. 2, 2019. Disponível: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/sustinere/article/view/41193>. Acesso em: 11 nov. 2023.

NASCIMENTO, C. J. Z. Molas. **Info Escola**, 2023. Disponível em: <https://www.infoescola.com/mecanica/molas/>. Acesso em: 28 set. 2023.

NSENGIYUMVA, W. *et al.* Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 81, p. 250 – 279, 2018. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117310183>. Acesso em: 11 nov. 2023.

PAIVA, E. **Desenvolvimento de um rastreador solar microcontrolado para um coletor solar concentrador**. 2009. Tese (Doutorado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PASSOS, F. Seguidor solar – parte 2: classificação tipos. **Microgeração fotovoltaica: Notícias, informações e curiosidades relacionadas com a energia solar fotovoltaica**, 2016. Disponível em: <https://microgeracaoofv.wordpress.com/2016/10/17/seguidor-solar-parte-2-tipos/>. Acesso em: 18 nov. 2022.

PRADO, T. F. *et al.* Estado da arte em mecanismos de rastreamento solar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, 20., 2015, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2015. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/estado-da-arte-em-mecanismos-de-rastreamento-solar-17678>. Acesso em: 11 nov. 2023.

QUEIROZ, J. *et al.* Classificação de rastreadores solares: uma breve revisão. *In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS*, 3., 2018, Curitiba. **Trabalhos apresentados** [...]. Curitiba: Universidade do Paraná, 2018. Disponível em: <https://eventos.ufpr.br/simproc/simproc3/paper/viewFile/1002/339>. Acesso em: 11 nov. 2023.

RECA-CARDEÑA, J.; LÓPEZ-LUQUE, R. design principles of photovoltaic irrigation systems. *In: RECA-CARDEÑA, J.; LÓPEZ-LUQUE, R. Advances in renewable energies and power technologies*. Amsterdã: Dimensions, 2018. p. 295–333. Cap. 9. Disponível em: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1101372954>. Acesso em: 11 dez. 2023.

RENOSTO, A. *et al.* Protótipo de sistema fotovoltaico com seguidor solar para aplicação didática. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 7., 2018, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: International Society of Energy Solar, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/219>. Acesso em: 11 nov. 2023.

REN21 – Renewables now. **Renewables global status report**. 2020. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

RODRIGUES, L. C.; FIGUEIRA, H. B. Comparação e viabilidade de diferentes tipos de rastreadores solares para geradores fotovoltaicos. **Revista científica multidisciplinar núcleo do conhecimento**, São Paulo, v. 8, p. 102-126, 2021. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/rastreadores-solares#>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SÁ, R. J. S. *et al.* Energias renováveis: energia solar fotovoltaica e energia eólica. **Multidisciplinary Reviews**, Mossoró, v. 2, n. 1, 2019. Disponível em: <https://malque.pub/ojs/index.php/mr/article/view/102>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SANTOS, E. J. C. **Tabela**: coeficiente de dilatação linear de alguns materiais. São Paulo: IFSP [2023]. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/edsonjose/disciplinas/fisica-ii-licenciatura-em-quimica-1/tabela-coeficiente-de-dilatacao-linear-de-alguns-materiais/view>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SCHULTZ, A.; DALLAVECHIA, G. Renewable energy and sustainability: a review. *In: JORNADA DA PESQUISA*, 27., 2022, Ijuí. **Anais** [...]. Ijuí: Salão do conhecimento do Unijuí, 2022. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/22339>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SILVA, G.; SOUZA, M. Estimativa de geração de energia através de um sistema fotovoltaico: implicações para um sistema flutuante no lago Bolonha. **Revista brasileira de energias renováveis Belém-Pará**, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46194>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SILVA, H.; ARAÚJO, F. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, São Paulo, v. 8, n. 3, 2022. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 11 Nov, 2023.

SOUZA, G. *et al.* Energias renováveis e as alternativas das matrizes energéticas sustentáveis. **Editora Uniedusul**, Maringá, v.3, p. 7–23, 2020. Disponível em: <https://www.uniedusul.com.br/publicacao/as-multiplas-visoes-do-meio-ambiente-e-os-impactos-ambientais/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

SOUZA, L. Um experimento sobre a dilatação térmica e a lei de resfriamento. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 18., 2009, Vitória. **Trabalhos apresentados [...]**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~carlos/conferencias/dilatacaotermica/dilatacaoTermica_Snef.pdf. Acesso em: 11 nov. 2023.

STRAUB, M. About us. **Usinainfo**: eletrônica & robótica, 2020. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/rastreador-solar-com-arduino-um-seguidor-solar-atraves-de-ldr/>. Acesso em: 17 nov. 2021.

SUMATHI, V. *et al.* Solar tracking methods to maximize PV system output: a review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 74, p. 130 – 138, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117302162>. Acesso em: 11 dez. 2023.

TECH SPRING. **About us**. 2023. Disponível em: <https://www.dai-yi.com.tw/pt/category/CAT-Power-Spring.html>. Acesso em: 28 set. 2023.

ZAZULA, R. M. *et al.* Análise de eficiência de um painel fotovoltaico utilizando um rastreador solar comparado a um estacionário. **Pesquisa e Inovação**: Revista científica de Engenharia, Guarapuava, v.1, n.2, 2019, Disponível em: <https://revista.camporeal.edu.br/index.php/pi/article/view/491>. Acesso em: 11 nov. 2023.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

COELHO, M.; MAIA, A. Por que o orifício em uma chapa se dilata de forma igual á própria chapa?. **Caderno brasileiro de ensino de Física**, Florianópolis, v. 34, n.1, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2017v34n1p324>. Acesso em: 11 nov. 2023.

MOUSAZADEH, H. *et al.* A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032109000318>. Acesso em: 11 nov. 2023.

APÊNDICE A1

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no primeiro dia.

A Tabela 7 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do primeiro dia das amostras dos três materiais metálicos.

O primeiro dia estava com condição climática de limpo.

Tabela 7 – Valores registrados das amostras no primeiro dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio ° C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
09:00	15	20,3	22,7	23,8	24,8	20,8	22,4	552,4	77
09:30	16	21,4	28,6	22,9	29	25	29,1	427,8	73
10:00	16	22,7	35,3	24,8	30,4	22,5	36,8	676	67
10:30	19	23,4	37,1	25,8	32,1	21,3	38,2	738	79
11:00	20	29,3	38,4	29,5	35,8	30,5	33,9	783,5	62
11:30	21	35,8	43,1	30,2	42,1	27	40,6	764,3	57
12:00	21	41,7	45,9	37,9	41,9	39,5	42,1	877,2	54
12:30	22	42	46	38	42	39,7	42,5	890	52
13:00	22	26,8	34	23,4	33,9	26,6	34,7	487,2	50
13:30	20	32,5	35,6	32,9	35,3	28,9	33,6	602,5	50
14:00	20	30,4	33,6	30,5	32,5	25	32,2	316,3	48

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no segundo dia.

A Tabela 8 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do segundo dia das amostras dos três materiais metálicos.

O segundo dia estava com condição climática de parcialmente limpo e parcialmente nublado.

Tabela 8 – Valores registrados das amostras no segundo dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m²	Umidade %
		Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta			
9:00	14	26,0	31,1	29,1	32,2	23,7	30,1	750,3	82
9:30	15	26,5	31,5	27,6	33,4	26,0	34,0	815,0	80
10:00	16	31,4	38,6	29,5	38,8	33,2	40,6	853,4	64
10:30	19	31,8	40,2	33,0	41,5	34,4	41,4	867,9	59
11:00	20	33,5	43,1	33,5	44,5	34,9	44,0	825,7	58
11:30	22	36,5	45,5	38,8	46	38,6	45,2	875,5	51
12:00	23	37,7	46,2	41,2	46,9	39,1	46,6	857,4	49
12:30	24	39	47	42	47,5	40	48	860,3	46
13:00	25	31,1	37,2	30,1	36,0	30,0	36,11	36,11	44
13:30	26	32,2	45,9	33,0	44,1	31,8	43,8	775,6	40
14:00	27	32,7	41,9	34,3	43,4	33,5	42,1	787,8	38

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no terceiro dia.

A Tabela 9 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do terceiro dia das amostras dos três materiais metálicos.

O terceiro dia estava com condição climática de parcialmente limpo e parcialmente nublado.

Tabela 9 – Valores registrados das amostras no terceiro dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	15	22,7	28,1	22,4	29,3	20,6	30	602,1	73
9:30	17	30	34,9	28,3	35,3	30,0	35,7	718,1	72
10:00	18	34,2	41,7	28,5	40,0	30,2	40,6	801,0	68
10:30	21	29,8	39,9	31,8	41,5	35,4	41,7	806	57
11:00	22	34,9	41,4	37,2	41,4	37,5	43,3	895,7	54
11:30	23	38,1	43,6	40,2	45,3	40	46,2	897,4	50
12:00	24	41,9	48,1	41,2	49,7	41,6	50	898	48
12:30	25	42,7	49,2	42	50,1	42,5	51,2	930,2	45
13:00	26	36,4	46,8	34,6	43	38,8	45	857,6	39
13:30	27	33,2	44	38,6	41,5	41,7	44,3	836,2	39
14:00	25	42,5	47,1	40,8	43,8	42,2	44,6	800,9	38

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no quarto dia.

A Tabela 10 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do quarto dia das amostras dos três materiais metálicos.

O quarto dia estava com condição climática de limpo.

Tabela 10 – Valores registrados das amostras no quarto dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	18	27	29	27,3	28,8	27,3	27,8	710,8	73
9:30	19	25,6	26,6	26,8	27,6	26	27	739,8	69
10:00	21	25	32,6	27,1	38,6	29,5	38,9	794,6	64
10:30	22	35,7	43,7	39,6	45,2	29,6	37,5	828,3	59
11:00	22	39,1	44,1	32,1	44,9	32,5	39,3	831,3	58
11:30	24	37,5	42,7	31	37,4	28,5	38	769,2	49
12:00	24	33,0	45,0	38,5	44,3	37,8	43,6	807,8	48
12:30	25	32,8	46,2	39,2	46,4	38,5	44,7	815,7	46
13:00	26	29,6	35	30,5	36	30,1	34,5	822,1	39
13:30	27	33,7	42,5	35,6	42,2	37,4	41,4	750	37
14:00	26	38,6	44,3	34,2	44,4	38,2	42,7	757,6	38

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no quinto dia.

A Tabela 11 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do quinto dia das amostras dos três materiais metálicos.

O quinto dia estava com condição climática de parcialmente limpo e parcialmente nublado.

Tabela 11 – Valores registrados das amostras no quinto dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio ° C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	18	15,9	18,9	18,2	19,3	19	19,2	70	74
9:30	19	16,1	20	16,4	19,8	19,8	20,2	390	71
10:00	19	23,4	28,6	17,4	30,3	20,3	24,3	208,6	70
10:30	19	19,8	25,1	16,6	26	24,3	25,6	933,2	68
11:00	20	20	32,5	21,5	34	24,0	34,6	179,5	66
11:30	21	21	28,5	25,5	26,3	25,3	26	161,3	64
12:00	12	19,3	27	23,1	25	27,7	30,4	752,8	62
12:30	22	23,6	28,1	27,6	29	27	28,6	205,9	55
13:00	23	21,8	33,2	25,6	42,7	31,6	37,6	467,8	51
13:30	22	21,8	33,2	25	29,5	29,1	29,6	251,5	56
14:00	22	21,3	35,4	17,6	31,6	30,1	31,0	474,2	57

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no sexto dia.

A Tabela 12 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do primeiro dia das amostras dos três materiais metálicos.

O sexto dia estava com condição climática de limpo.

Tabela 12 – Valores registrados das amostras no sexto dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	20	20,3	33	20,5	28,6	20,1	28	508,5	77
9:30	21	30,4	38,6	23,1	37,5	28,5	38,5	637,8	71
10:00	22	32,8	36,3	25,1	36,7	21,2	37,7	430,9	67
10:30	23	35,7	43,1	28,6	41,9	30,0	44,2	753,3	64
11:00	24	37,1	42,7	35,1	42,4	30,9	40,6	791,3	58
11:30	25	41,4	50,1	26	45,2	38,9	42,5	788,8	55
12:00	26	30,1	48,7	40,0	48,4	45,5	50,3	834,9	50
12:30	28	34	40,3	29,0	38,6	37,9	40,3	423,8	45
13:00	28	31,2	39,3	30,5	37,7	37	38,8	410,2	44
13:30	29	33,3	49,7	42,8	45,6	44,1	46,8	809,8	44
14:00	29	45,6	50	44,9	49,7	48,8	50,9	752,8	43

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no sétimo dia.

A Tabela 13 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do sétimo dia das amostras dos três materiais metálicos.

O sétimo dia estava com condição climática de nublado.

Tabela 13 – Valores registrados das amostras no sétimo dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	21	19,8	20,1	20	20,3	17,7	19,8	105,6	74
9:30	21	24,8	25,3	23,7	25	24,1	25,2	307,2	73
10:00	22	25,6	35,3	31,4	32,2	29,6	35,3	694,6	70
10:30	22	26,5	44	25,6	45,5	28	45,3	747,6	64
11:00	23	37	46,5	29,1	46,8	37,9	45,7	782,4	62
11:30	24	41,7	44	41,1	44,7	42,4	45	807,5	58
12:00	26	42,8	50	37,5	47,8	43,3	46,9	790,7	52
12:30	28	37,7	43,3	38,9	43,4	40	42,1	626,9	48
13:00	28	40	46	32,2	40,2	38,4	41	589,2	46
13:30	29	42,4	51,6	41,2	45,9	44,9	48,4	769,1	42
14:00	29	41,4	45,6	43	44,4	41,1	45,2	707,1	39

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no oitavo dia.

A Tabela 14 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do primeiro dia das amostras dos três materiais metálicos.

O oitavo dia estava com condição climática de limpo.

Tabela 14 – Valores registrados das amostras no oitavo dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	17	26,1	33	34	35,1	28,5	32,1	654,3	79
9:30	19	23,4	37,1	31,8	36,2	34,4	36,5	712,3	73
10:00	21	32,1	38,6	28,3	39,5	38,5	39,3	782,4	68
10:30	22	30,8	43,1	29,5	44,0	41,1	41,3	824,7	61
11:00	23	38,2	41,8	26,3	41,5	33,6	43,4	760,9	57
11:30	24	37,9	43,8	37,7	45,2	39,6	46,2	822,3	54
12:00	25	32,2	50,1	29	46,9	34,9	45,7	751,8	50
12:30	27	32,2	40,8	34,8	41,4	32,1	41,1	804,3	46
13:00	28	34,7	39,6	36,1	39,8	37,5	37,7	593,4	44
13:30	29	41,7	43,3	39,8	43,8	39,1	45	789,4	38
14:00	29	45	49,1	42,5	43,5	43,1	48,1	791,8	37

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no nono dia.

A Tabela 15 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do primeiro dia das amostras dos três materiais metálicos.

O nono dia estava com condição climática de parcialmente nublado e parcialmente limpo.

Tabela 15 – Valores registrados das amostras no nono dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	17	14,7	18,6	13	18,1	16,4	18,8	110,8	74
9:30	16	13,7	22	12	21,8	17,7	20,8	294,2	82
10:00	17	18,3	24,1	25,8	30	22,9	31,2	701,7	78
10:30	18	21,7	38,4	24,6	34,9	25	40,5	900,6	73
11:00	19	26,5	42,4	30,4	40,5	31,4	42,2	902	68
11:30	21	32,3	48,8	33,2	48,5	35,5	49,8	935,2	58
12:00	21	32,6	49,6	36,7	48,1	38,1	47,4	924,9	56
12:30	22	31,4	46,3	36,8	49,1	37,7	46,5	717,8	52
13:00	25	30,2	38,2	38,1	36,1	37	35,3	319	46
13:30	26	34	41,8	35,3	41,7	37,8	41,5	270,4	41
14:00	27	48,1	58,1	41,1	60,2	57,6	52,4	832,1	38

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição solar das amostras dos materiais metálicos no décimo dia.

A Tabela 16 contém os resultados de temperatura, radiação solar e umidade de exposição do décimo dia das amostras dos três materiais metálicos.

O décimo dia estava com condição climática de nublado.

Tabela 16 – Valores registrados das amostras no décimo dia

Horário	Temperatura Ambiente °C	Temperatura Aço °C		Temperatura Alumínio °C		Temperatura Latão °C		Radiação Solar W/m ²	Umidade %
			Tinta preta		Tinta preta		Tinta preta		
9:00	21	14,4	23,1	17,2	23,2	17,6	24,1	157,5	67
9:30	22	22,9	30,1	19,3	29,8	20,6	29	345,1	63
10:00	22	20,8	30,4	29	31,9	27,6	30,7	265,4	62
10:30	23	20,8	37,4	22,2	43,8	32,8	43,5	812,4	59
11:00	23	45,6	51,2	20,5	50,4	32,6	47,1	862,2	57
11:30	24	17,4	30	19,1	29,6	26	29,5	116,5	51
12:00	24	15,4	30,4	17,7	29,3	28,6	30,5	174,6	50
12:30	25	20,5	29,6	19,3	28,5	26,1	28,5	75,4	52
13:00	26	20,6	25,8	20,3	25,5	24,4	26,5	40,3	51
13:30	25	23,6	26,1	19,1	27,1	18,9	26,3	74,4	51
14:00	24	21	36,1	26	42,2	21,3	39,9	678,7	52

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE A2

Dados da exposição da lâmina bimetálica sob a forma de termômetro a primeira situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro sozinha.

A Tabela 17 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da primeira situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 17 – Primeira situação da lâmina bimetálica.

1 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro sozinha.							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau Inicial (°)	Temperatura Haste (°C)	Graus Final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	946,4	32	32	46,5	75	15,6	43
2	898,3	34	34	48,5	79,5	9,3	45,5
3	754,4	23	8	33	37	10	29
4	782,1	27	23	40	53	13	30
5	841,4	29	25	45	65	16	40
6	227,5	26	17	32	37	6	15

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição do termômetro a segunda situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro dentro do vidro.

A Tabela 18 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da segunda situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 18 – Segunda situação da lâmina bimetálica.

2 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro dentro do vidro.							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau Inicial (°)	Temperatura Haste	Grau Final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	866,9	34	34	58	105	24	71
2	824,4	26	27,5	50	80	24	52,5
3	860,1	28	20	51	82	23	62
4	817,3	30	30	58	106	28	76
5	839	32	32	45	71	13	39
6	229,8	27	25	33	52	12	27

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição do termômetro a terceira situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro com chapa na cor natural.

A Tabela 19 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da terceira situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 19 – Terceira situação da lâmina bimetálica.

3 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro com chapa de cor natural							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau inicial (°)	Temperatura Haste (°C)	Grau final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	922,6	32	32	50	80	18	48
2	872,2	34	34	54	95	20	61
3	800,7	23	8	38,5	50	15,5	42
4	879	27	23	42	57,5	15	34,5
5	874,3	29	25	49	76	20	51
6	224	26	17	32	37	6	20

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição do termômetro a quarta situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro dentro do vidro com a chapa de latão na cor natural.

A Tabela 20 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da quarta situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 20 – Quarta situação da lâmina bimetálica.

4 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro dentro do vidro com a chapa de latão na cor natural							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau inicial (°)	Temperatura Haste (°C)	Grau final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	859,6	25	17	55	94	30	77
2	882,6	34	35	61	110	27	75
3	862	28	20	60	108	42	88
4	823,7	30	30	64	122	34	92
5	809,5	32	32	53	95	21	63
6	140,5	27	25	37	50	10	25

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição do termômetro a quinta situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro com chapa de latão enegrecido.

A Tabela 21 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da quinta situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 21 – Quinta situação da lâmina bimetálica.

5 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro com chapa de cor preta							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau inicial (°)	Temperatura Haste (°C)	Grau final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	820,5	24	10	43,8	62	19,8	52
2	854,6	28	20	48	75	20	55
3	799,7	29	25	46	82	17	57
4	794,2	32	32	51	85	19	53
5	826,7	32	32	52	90	20	58
6	223,1	27	25	33	37	5	12

Fonte: Autor (2023).

Dados da exposição do termômetro a sexta situação: a lâmina bimetálica sob a forma de termômetro dentro do vidro com chapa de latão enegrecido.

A Tabela 22 contém os valores de temperatura ambiente, grau trigonométrico inicial, temperatura da haste, grau trigonométrico final, variação de temperatura e variação de graus trigonométricos da sexta situação que o termômetro foi submetido.

Tabela 22 – Sexta situação da lâmina bimetálica.

6 - Lâmina bimetálica sob a forma de termômetro com chapa na cor preta dentro do vidro							
	Radiação W/m²	Temperatura Ambiente (°C)	Grau inicial (°)	Temperatura Haste (°C)	Grau final (°)	ΔT (°C)	ΔGT (°)
1	843,6	24	10	52	83,5	28	73,5
2	854,1	28	20	62	103	54	83
3	818,6	29	25	63,5	114	44,5	89
4	860,7	32	32	60	108	28	76
5	894,3	32	32	63	118	31	86
6	210,3	27	25	36	48	9	23

Fonte: Autor (2023).

TRABALHOS DESENVOLVIDOS DURANTE O MESTRADO

Participação e apresentação do artigo “Rastreadores Solares: Uma revisão bibliográfica” no XLIV International Sodebras Congress do dia 10 a 12 de novembro de 2021, de forma online.

Participação e apresentação do artigo “Estrutura móvel de rastreamento solar com dilatação metálica” no XLV International Sodebras Congress do dia 25 a 27 de maio de 2023 em Curitiba-PR no auditório de eventos do hotel Rockefeller.

Participação e apresentação do artigo “Proposta de rastreador solar de um grau de liberdade utilizando material bimetalico” no V Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção nos dias 23 e 24 de novembro de 2021, de forma online.

Participação e apresentação “Proposta de um mecanismo de espiral bimetalica para rastreador solar” no VI Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção nos dias 5 e 6 de dezembro de 2022, na Unesp de Guaratinguetá-SP, no auditório da Inove.

Artigos publicados em Anais de Eventos e Periódicos.

SOUZA, R. S.; JESUS, N. M. R.; SOUZA, T. M.; CASTRO, T. S. RASTREADORES SOLARES: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista SODEBRAS**, [s. l.], v. 17, n. 193, p. 157–166, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.17.2022.193.157>. Acesso em: 10 out. 2023.

SOUZA, R. S.; JESUS, N. M. R.; CASTRO, T. S.; SOUZA, T. M. ESTRUTURA MÓVEL DE RASTREAMENTO SOLAR COM DILATAÇÃO METÁLICA. **Revista Sodebras**, [s. l.], v. 18, n. 212, p. 93–99, 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.2023.212.93>. Acesso em: 10 out. 2023.

SOUZA, R.; SOUZA, T.; CASTRO, T. **PROPOSTA DE RASTREADOR SOLAR DE UM GRAU DE LIBERDADE UTILIZANDO MATERIAL BIMETÁLICO**. Guaratinguetá: [s. n.], 2021. ISBN 978-65-89235-01-9. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/#!/eventos/v-workshop-de-engenharia-mecanica-e-de-producao-v-wsp/anais-do-evento/>. Acesso em: 10 out. 2023.

SOUZA, R.; SOUZA, T.; CASTRO, T. **PROPOSTA DE UM MECANISMO DE ESPIRAL BIMETÁLICA PARA RASTREADOR SOLAR**. Guaratinguetá: [s. n.], 2022. ISBN 978-65-89235-03-3. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/Eventos/viiworkshopdeengenhariamecanicaedeproducao/anais-vi-wpg-2022---completo-com-ficha-isbn.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

Elaboração de patente:

Está em elaboração a patente de um rastreador solar com dilatação metálica e bimetálica. O projeto se destaca como inovador pelo fato do mecanismo de deslocamento ao longo dia, ser a dilatação metálica de um material específico. Foram realizados experimentos para relacionar a variação de temperatura com variação trigonométrica. Os principais conceitos apresentados são o deslocamento angular por material bimetálico em uma lâmina sob forma de termômetro.