



**INSTITUTO  
FEDERAL**

Bahia

---

Campus  
Jequié

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
BAHIA  
CAMPUS JEQUIÉ  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SAULO ALVES DE SOUZA**

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM FOGÃO SOLAR COM  
SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR**

**JEQUIÉ-BA  
2023**

**SAULO ALVES DE SOUZA**

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM FOGÃO  
SOLAR COM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Fabiano Borges

Coorientadora Prof. Dra. Rita de Cassia Souza de Queiroz Lopes

JEQUIÉ-BA  
2023

**SAULO ALVES DE SOUZA**

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM FOGÃO  
SOLAR COM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR**

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “Construção e análise de desempenho de um fogão solar com sistema de rastreamento solar” elaborado por “Saulo Alves de Souza” como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Ensino de Matemática, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Jequié-BA, 19/12/2023

Comissão Examinadora

---

**Prof. Esp. Fabiano Borges**  
IFBA  
(Orientador)

---

**Prof. Dr. Marcio Andrade Rocha**  
IFBA

---

**Prof. Dra. Rita de Cassia Souza de Queiroz  
Lopes**  
IFBA

---

**Prof. Me Romario Sousa Silva**  
IFBA

Dedico esse trabalho a minha família, que sempre me apoiou, me incentivou a buscar o conhecimento e a nunca desistir. Essa conquista é nossa e é a primeira de muitas que virão.

## Agradecimentos

- Aos meus pais, que sempre me apoiaram e me incentivaram a buscar o conhecimento e a nunca desistir.
- A minha irmã, que sempre me ajudou e me apoiou em todos os momentos.
- Ao meu amigo e orientador Prof. Fabiano Borges, que me ajudou e me guiou durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.
- A minha coorientadora Prof.<sup>a</sup> Rita de Cássia, que me inseriu no mundo da pesquisa e me ajudou a desenvolver este trabalho.
- Aos meus amigos, que me ajudaram e me apoiaram durante todo o processo. Que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.
- A todos os professores e servidores do IFBA, que fizeram parte da minha formação e contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.
- Aos membros da banca, pela disponibilidade e avaliações que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

## Resumo

A energia solar é uma alternativa energética fundamental para as próximas gerações, por sua característica de ser limpa, renovável e quase inesgotável. O fogão solar é uma tecnologia que aproveita a energia solar para cozinhar alimentos, além disso, o uso do fogão solar pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida de famílias de baixa renda, que muitas vezes não têm acesso a fontes de energia convencionais, como o gás de cozinha. O fogão solar é uma tecnologia acessível e de baixo custo, que pode reduzir os gastos com energia, melhorar a saúde das famílias, pois não emite poluentes e a mitigação dos impactos ambientais negativos. O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência do equipamento no cozimento de alimentos utilizando diferentes configurações de funcionamento. O fogão solar parabólico projetado apresentou parâmetros geométricos de diâmetro de 1,3 m e distância focal de 70,4cm. O sistema de rastreamento solar adotou uma abordagem ativa, com um eixo e 4 sensores fotorresistivos para determinar a posição ideal para captação da radiação solar. Foram realizados ensaios com as configurações bi e mono-focal, além da aplicação de métodos teóricos para supor a eficiência utilizando o sistema de rastreamento. Os resultados indicaram que a configuração mono-focal apresentou uma eficiência de 72,3%, enquanto a configuração bi-focal apresentou uma eficiência de 43%. Os resultados deste estudo demonstram o potencial dos fogões solares com sistema de rastreamento solar na cocção de alimentos. O uso de tecnologias limpas e sustentáveis, como o fogão solar, tem potencial para melhorar a qualidade de vida, o bem-estar socioambiental e contribuir para a preservação dos recursos naturais.

**Palavras-chave:** Energia solar; Tecnologia social; Radiação solar, Sustentabilidade.

## **Abstract**

Solar energy is a fundamental energy alternative for future generations, due to its clean, renewable, and almost inexhaustible characteristics. The solar cooker is a technology that harnesses solar energy for cooking food. Additionally, the use of solar cookers can contribute to improving the quality of life for low-income families who often lack access to conventional energy sources such as cooking gas. Solar cookers are affordable and low-cost technologies that can reduce energy expenses, improve family health by emitting no pollutants, and mitigate negative environmental impacts. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the equipment in cooking food using different operating configurations. The designed parabolic solar cooker had geometric parameters of a diameter of 1.3 m and a focal distance of 70.4 cm. The solar tracking system adopted an active approach, with one axis and four photoresistive sensors to determine the optimal position for capturing solar radiation. Tests were conducted with bi-focal and mono-focal configurations, as well as the application of theoretical methods to estimate efficiency using the tracking system. The results indicated that the mono-focal configuration achieved an efficiency of 72.3%, while the bi-focal configuration achieved an efficiency of 43%. The results of this study demonstrate the potential of solar cookers with solar tracking systems in food cooking. The use of clean and sustainable technologies, such as solar cookers, has the potential to improve quality of life, socio-environmental well-being, and contribute to the preservation of natural resources.

**Keywords:** Solar energy; Social technology; Solar radiation; Sustainability.

## Lista de figuras

Figura 1 – Distribuição da radiação solar que chega à superfície terrestre, expressa em kcal/(cm <sup>2</sup> /ano). . . . .	4
Figura 2 – Esquema de um sistema de energia fotovoltaica. . . . .	5
Figura 3 – Coletor solar plano. . . . .	6
Figura 4 – Média anual de irradiação global na Bahia. . . . .	7
Figura 5 – Exemplificação da condução térmica por condução. . . . .	8
Figura 6 – Transferência de calor por convecção. . . . .	9
Figura 7 – Esquema de radiação incidente. . . . .	9
Figura 8 – Fogão do tipo caixa. . . . .	11
Figura 9 – Fogão do tipo reflexivo. . . . .	12
Figura 10 – Fogão do tipo concentrador. . . . .	13
Figura 11 – Rastreador solar. . . . .	14
Figura 12 – parabólica usada na construção. . . . .	15
Figura 13 – Vinil adesivo metalizado. . . . .	16
Figura 14 – Focalização de feixes de radiação paralelos em espelhos cilíndricos com diferentes ângulos de borda. . . . .	17
Figura 15 – Montagem da parabólica. . . . .	19
Figura 16 – Estrutura do fogão solar. . . . .	20
Figura 17 – Montagem do equipamento. . . . .	20
Figura 18 – Sensor de posicionamento solar. . . . .	22
Figura 19 – Diagrama de fluxo de operação do microcontrolador. . . . .	23
Figura 20 – Processo de conversão de energia solar em energia térmica. . . . .	24
Figura 21 – Ajustes realizados. . . . .	27
Figura 22 – Ensaios realizados. . . . .	28
Figura 23 – Termômetro infravermelho. . . . .	29
Figura 24 – Medição de temperatura. . . . .	29
Figura 25 – Medição de radiação solar. . . . .	30
Figura 26 – Parabólica revestida com vinil adesivo metalizado. . . . .	35
Figura 27 – Parabólica em formato elíptico. . . . .	36

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões da parabólica. . . . .	18
Tabela 2 – Comparação entre técnicas de rastreamento. . . . .	21
Tabela 3 – Dados coletados no ensaio 1. . . . .	36
Tabela 4 – Dados coletados no ensaio 2. . . . .	37
Tabela 5 – Comparação entre os ensaios. . . . .	37
Tabela 6 – Comparação entre as eficiências. . . . .	41
Tabela 7 – Coeficientes de regressão. . . . .	42
Tabela 8 – Erro padrão. . . . .	42
Tabela 9 – Valores previstos. . . . .	43
Tabela 10 – Comparação entre as eficiências. . . . .	43

## **Lista de abreviaturas e siglas**

IFBA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
MPPT	Maximum Power Point Tracking
LDR	Light Dependent Resistor
P&O	Perturb and Observer

## Lista de símbolos

$\eta_u$	Eficiência do fogão solar
$\eta_o$	Eficiência óptica
$\eta_t$	Eficiência térmica
$I_c$	Radiação instantânea coletada pelo sistema de captação de energia solar (W/m <sup>2</sup> )
$A_u$	Área útil do concentrador. (m <sup>2</sup> )
$\rho$	Refletividade do concentrador (%)
$K_{rd}$	Fração da radiação refletida que é absorvida pela panela (%)
$a_p$	Absortividade da panela (%)
$P_{abs}$	Potência máxima absorvida pela panela (W)
$H_{ce}$	Coefficiente de convecção entre a superfície externa da panela e o ar ambiente. (W/m <sup>2</sup> . oC)
$A_{lp}$	Área lateral da panela (m <sup>2</sup> )
$T_p$	Temperatura externa da panela (°C)
$T_a$	Temperatura ambiente (°C)
$C_k$	Coefficiente de convecção
$n$	Expoente
$V_v$	Velocidade do vento (m/s)
$P_{perda}$	Potência de perda (W)
$P_{util}$	Potência útil (W)
$Q_u$	Calor útil (J)

# Sumário

<b>Resumo</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>Lista de figuras</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>Lista de tabelas</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Lista de abreviaturas e siglas</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>Lista de símbolos</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>1 – Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral . . . . .	2
1.2 Objetivos Específicos . . . . .	2
<b>2 – Referencial Teórico</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Energia Solar . . . . .	3
2.1.1 Energia fotovoltaica . . . . .	4
2.1.2 Energia fototérmica . . . . .	5
2.1.3 Energia bioclimática . . . . .	6
2.1.4 Potencial na Bahia . . . . .	7
2.2 Transferência energética na cocção . . . . .	7
2.2.1 Condução . . . . .	8
2.2.2 Convecção . . . . .	8
2.2.3 Radiação . . . . .	9
2.3 Óptica . . . . .	10
2.3.1 Reflexão . . . . .	10
2.3.2 Refração . . . . .	10
2.4 Fogões solares . . . . .	10
2.4.1 Fogão do tipo caixa . . . . .	10
2.4.2 Fogão do tipo reflexivo . . . . .	11
2.4.3 Fogão do tipo concentrador . . . . .	12
2.4.4 Rastreador solar . . . . .	13
<b>3 – Metodologia</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1 Descrição do Fogão . . . . .	15
3.1.1 Materiais Utilizados . . . . .	15

3.1.2	Dimensões do Fogão . . . . .	16
3.2	Processo de fabricação e montagem do fogão solar . . . . .	18
3.2.1	Colagem do material refletor . . . . .	18
3.2.2	Parabólica montada . . . . .	18
3.2.3	Confecção da estrutura . . . . .	19
3.2.4	Montagem do equipamento sem o sistema de rastreamento solar . . . . .	20
3.3	Sistema de Rastreamento Solar . . . . .	21
3.3.1	Pesquisa Bibliográfica . . . . .	21
3.3.2	Projeto e Montagem do Sistema . . . . .	21
3.4	Eficiência de um fogão solar . . . . .	23
3.5	Ajustes finais . . . . .	27
3.6	Metodologia dos ensaios . . . . .	27
3.6.1	Parâmetros Controláveis . . . . .	28
3.6.2	Parâmetros Não-controláveis . . . . .	28
3.6.3	Ensaio com o rastreamento solar . . . . .	30
<b>4</b>	<b>– Resultados . . . . .</b>	<b>35</b>
4.1	Resultados da construção do fogão solar . . . . .	35
4.1.1	Parabólica . . . . .	35
4.2	Ensaio realizado . . . . .	35
4.2.1	Configuração Bi-focal . . . . .	36
4.2.2	Configuração Mono-focal . . . . .	37
4.2.3	Comparação entre os ensaios . . . . .	37
4.3	Eficiência do fogão solar . . . . .	37
4.3.1	Eficiência na configuração bi-focal . . . . .	38
4.3.2	Eficiência na configuração mono-focal . . . . .	40
4.3.3	Comparação entre as eficiências . . . . .	41
4.4	Rastreamento solar . . . . .	42
<b>5</b>	<b>– Conclusão . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>– Sugestões para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>45</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>46</b>

# 1 Introdução

“o sol irradia anualmente o equivalente a 10 mil vezes a energia consumida pela população mundial neste mesmo período” observa Andrade Filho (2021) em sua pesquisa. Segundo Pinho et al. (2014), o sol é a origem de praticamente todas as outras fontes de energia, o que faz dessa fonte uma das mais importantes para a humanidade. Aproveitar o potencial solar é interessante para mitigar mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Diante disso, com o intuito de conciliar o progresso econômico com a preservação ambiental, surgem as discussões sobre o desenvolvimento sustentável. Esse novo modelo promove a busca por fontes alternativas e sustentáveis de energia. Segundo Pinto et al. (2013), a energia limpa é aquela proveniente de fontes naturais que não causam danos ao meio ambiente, e se mostra como uma importante aliada na busca por um desenvolvimento sustentável em harmonia com a natureza.

Entre as principais fontes de energia limpa estão a energia solar, hídrica, eólica, geotérmica e de biomassa. Dentre essas fontes, a energia solar se destaca como uma das mais viáveis, devido ao baixo impacto ambiental e disponibilidade para todos. Nesse sentido, a difusão do uso da energia solar, como nos *Concentrated Solar Power - CSP* utilizados em fornos e fogões solares, apresenta-se como estratégia relevante para impulsionar a adoção de fontes de energia limpa. Essas tecnologias oferecem uma alternativa viável e promissora, permitindo a ampliação da utilização de energia sustentável em diversas atividades cotidianas, incluindo a cocção de alimentos.

Cozinhar é um procedimento comum, que é indispensável para a evolução e manutenção do ser humano, entretanto, segundo Andrade Filho (2021), a fonte de combustível mais utilizada para a cocção de alimentos é o gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gás de cozinha, oriundo de um combustível fóssil não renovável. Para Andrade Filho (2021) houve um aumento significativo no custo do GLP, tornando o produto inviável para consumidores de baixa renda, que substituem essa fonte por outras tecnologias ultrapassadas e ineficientes, como a lenha e carvão, igualmente poluentes e degradantes.

Os fogões solares são capazes de concentrar o calor dos raios solares e utilizá-lo para cozinhar alimentos, aquecer água e desidratar resíduos sólidos. Diante destas afirmações, estes dispositivos são uma opção prática e econômica para a aplicação da energia solar no Brasil, especialmente em regiões rurais áridas e semiáridas onde a extração de lenha para obtenção de energia térmica pode ser um problema.

Além de ser uma fonte de energia limpa, os fogões solares apresentam uma melhor relação custo-benefício e se apresentam como solução viável para a população de baixa

renda, sem acesso a fontes convencionais de energia. Neste cenário, para desenvolver o equipamento que seja eficientemente aplicável nas residências, devemos observar alguns parâmetros construtivos para otimização do processo de conversão desta radiação disponível em produto final. Vale salientar que este aproveitamento energético pode ser direto, quando a energia solar é diretamente convertida em energia térmica, ou indireto, quando é necessário a conversão em outro tipo de energia, tal como a elétrica.

Dos diversos parâmetros essenciais na busca da melhor solução para a conversão de energia solar para térmica, devemos observar, principalmente, o ângulo de incidência dos raios solares. Segundo Ackhari et al. (2021), esse ângulo varia ao longo do dia e com a declinação solar, caracterizando um cenário de maior captação energética quando a face refletiva do concentrador solar esta voltado diretamente para o sol. Neste sentido, saber a posição do sol pode garantir a construção de uma melhor solução. Com isso, o uso de um rastreador solar produz um maior alinhamento a partir da diminuição do angulo de incidência e, conseqüentemente, uma maior eficiência no processo de conversão.

As principais tecnologias utilizadas nos rastreadores solares são baseadas em tres modelos. O primeiro consiste em um algoritmo fixo que movimenta o coletor de acordo com parâmetros predefinidos, sendo a precisão dependente do algoritmo e do mecanismo de movimentação do sistema. Por outro lado, o segundo modelo é conhecido como rastreadores ativos, que utilizam sensores para detectar a posição do sol e controladores para ajustar os mecanismos de movimentação. Por fim, existem os sistemas híbridos, que combinam um algoritmo para manter o alinhamento do coletor independentemente da disponibilidade de radiação solar, e um sensor de posicionamento que corrige possíveis desalinhamentos (UPADHYAY et al., 2021).

## 1.1 Objetivo Geral

Diante do exposto, este estudo tem o intuito de desenvolver um fogão solar parabólico, com sistema de rastreamento solar, para cocção de alimentos.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver o fogão solar parabólico;
- Projetar um sistema de rastreamento solar adequado ao modelo desenvolvido;
- Comparar o modelo desenvolvido com o modelo tradicional, verificando a otimização da captura da energia solar, bem como a eficiência do fogão.

## 2 Referencial Teórico

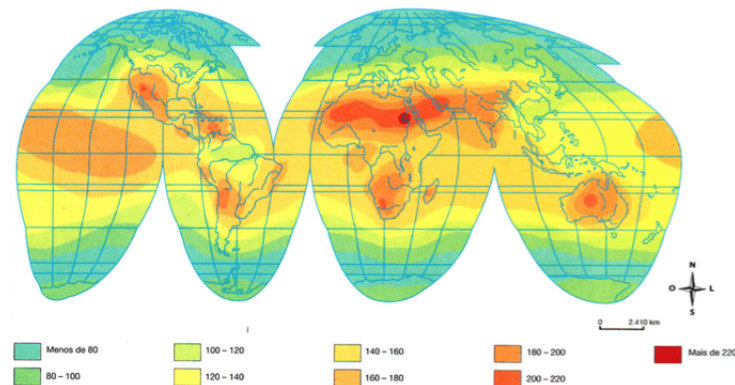
A utilização de recursos fósseis na geração de energia representa uma ameaça significativa ao meio ambiente, devido à emissão intensiva de gases poluentes, que contribuem para o aquecimento global. O emprego da energia solar como alternativa aos combustíveis fósseis é fundamental para preservar e promover a sustentabilidade, uma vez que reduz substancialmente a degradação ambiental.

### 2.1 Energia Solar

No núcleo do Sol, ocorre um processo fundamental conhecido como fusão nuclear, no qual dois núcleos de hidrogênio se combinam para formar um núcleo de hélio. Esse processo gera uma imensa quantidade de energia que é liberada no espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Dado que o Sol está localizado a uma distância de 143 milhões de quilômetros da Terra, apenas uma pequena fração dessa energia irradiada alcança o nosso planeta. No entanto, é importante destacar que a quantidade de energia que a Terra recebe do Sol em apenas um quarto de hora supera a quantidade de energia consumida em todo o mundo ao longo de um ano. Isso realça a incrível magnitude do potencial energético solar (SILVA et al., 2019).

A energia solar, de maneira simples e direta, refere-se à energia proveniente da radiação solar que atinge a superfície da Terra. A exploração dessa radiação solar representa uma das alternativas mais promissoras em termos de fontes de energia limpa, uma vez que está amplamente disponível em praticamente todas as regiões do planeta, embora de forma desigual. Essa distribuição desigual é atribuída à posição da Terra em relação ao Sol e ao seu movimento em torno da estrela. As regiões próximas à linha do equador são as mais favorecidas, enquanto as regiões polares são as menos beneficiadas, com variações sazonais que resultam em maior disponibilidade de energia solar durante o verão em comparação com o inverno (KRAUSE; PIMENTA, 2021).

Figura 1 – Distribuição da radiação solar que chega à superfície terrestre, expressa em kcal/(cm<sup>2</sup>/ano).



Fonte: Web (2019).

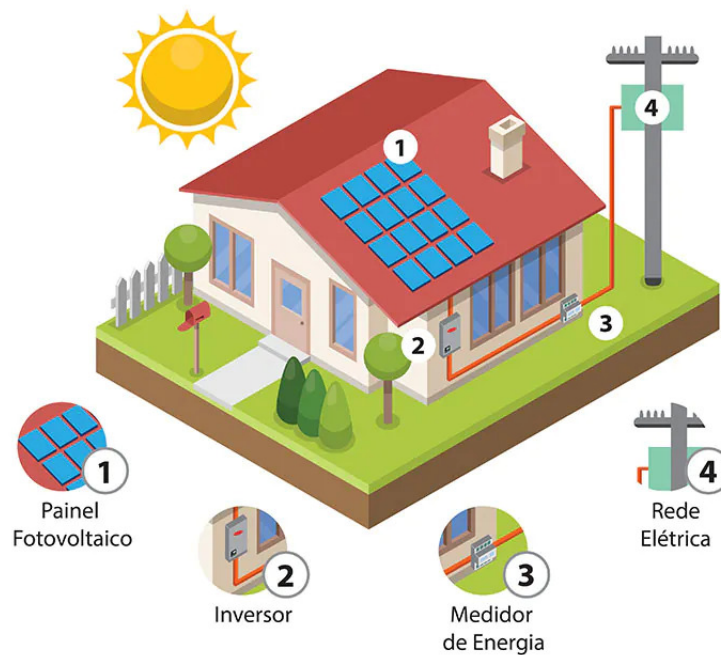
A radiação solar que chega na Terra é composta por três componentes: a radiação direta, que vem diretamente da direção do disco solar; a radiação difusa, que está inclusa a radiação solar que é espalhada pela atmosfera terrestre; e a radiação refletida, que é a radiação solar refletida pela superfície terrestre. No entanto, Gonçalves (2022) menciona que a radiação solar que chega na Terra é composta por uma mistura de várias radiações com comprimentos de onda diferentes, que se distinguem em três tipos: a luz ou radiação visível, a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha.

Para Chianca (2019), a energia solar é categorizada em dois tipos principais: ativa e passiva. A energia solar ativa, assim chamada por envolver a conversão para energia elétrica, é subdividida em duas categorias, fototérmica e fotovoltaica. Enquanto isso, a energia solar passiva refere-se à geração de energia sem a necessidade de equipamentos específicos e inclui a abordagem bioclimática.

### 2.1.1 Energia fotovoltaica

A energia fotovoltaica é uma das formas de energia solar ativa, que é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade pelo efeito fotovoltaico. Segundo Ferreira e Filho (2010), esse efeito foi relatado por Edmond Becquerel em 1839 e se dá pelo aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Os painéis solares fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas, que são feitas de materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz solar e geram uma corrente elétrica. Essa corrente elétrica pode ser utilizada para alimentar equipamentos elétricos ou ser armazenada em baterias para uso posterior. A energia fotovoltaica é uma fonte de energia limpa e renovável, que não emite gases poluentes e não gera resíduos tóxicos.

Figura 2 – Esquema de um sistema de energia fotovoltaica.



Fonte: Brandão (2018).

Segundo Dienstmann (2009), os fótons têm a capacidade de elevar os elétrons para níveis de energia mais elevados dentro da matéria, porém, esses elétrons tendem a retornar rapidamente ao seu estado inicial de energia. No entanto, em um dispositivo fotovoltaico, ocorre uma assimetria que direciona os elétrons excitados para fora do material antes que possam relaxar, impulsionando-os em direção a um circuito externo. Esse movimento gera uma diferença de potencial, resultando na produção de energia elétrica a partir da energia adicional dos elétrons excitados.

### 2.1.2 Energia fototérmica

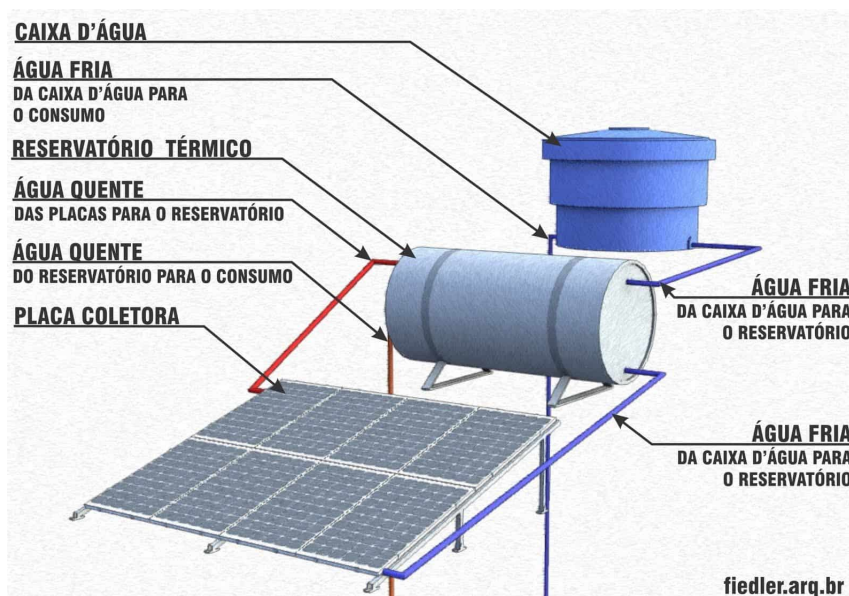
Outra modalidade de aproveitamento da energia solar é por meio do efeito fototérmico. A energia solar fototérmica é uma fonte de energia renovável que explora a capacidade da luz solar de gerar calor, sendo empregada para aquecer água, secar produtos e até mesmo produzir eletricidade através de processos termodinâmicos. Esse método envolve a concentração da luz solar em um receptor especializado, que absorve a radiação e a converte em calor. Esse calor resultante pode ser utilizado para aquecer água, gerar vapor e, por meio de turbinas a vapor, produzir eletricidade (CIAMPONI, 2015).

A energia fototérmica é obtida por meio de coletores solares projetados para capturar a energia solar e convertê-la em calor. Esses coletores são construídos de maneira a atingir altas temperaturas. Para isso, é essencial que a radiação solar incida sobre o refletor ou a lente com o

ângulo correto para focalizar o calor no absorvedor.

Existem diversos tipos de coletores solares, sendo o coletor solar plano um dos mais utilizados. Ele é apreciado por sua construção simples, custo acessível, facilidade de manutenção e capacidade de funcionar mesmo em dias nublados. Esse tipo de coletor é composto por uma placa absorvedora, tubos pelos quais o fluido a ser aquecido circula, uma cobertura transparente e isolamento térmico. A função da placa absorvedora é converter a energia solar em calor, que é transferido para os tubos e, por fim, para o fluido, realizando o aquecimento (CAVALCANTE, 2023).

Figura 3 – Coletor solar plano.



Fonte: Telhanorte (2023).

### 2.1.3 Energia bioclimática

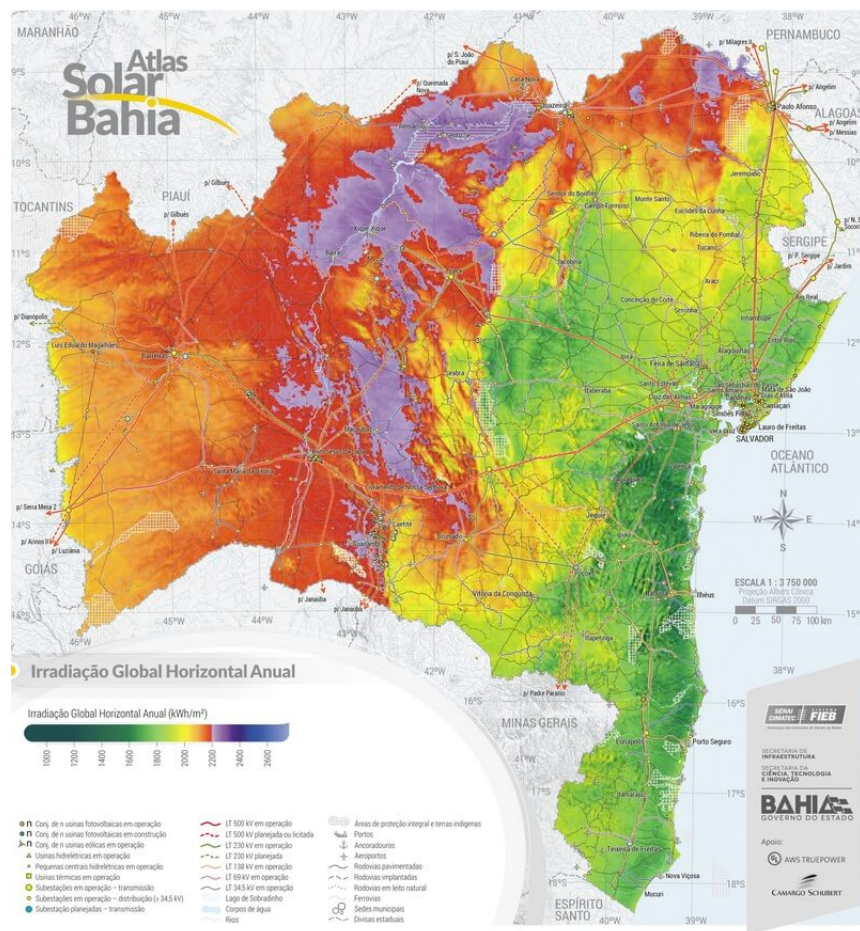
Nesse tipo de energia, nenhum objeto específico é utilizado para usar essa energia e por esse motivo, é o que possui o maior custo benefício e possui uma função social. A principal função da energia bioclimática é captar e armazenar o calor vindo da energia solar. Ela pode ser utilizada em diversas aplicações, como no aquecimento de água, no aquecimento de ambientes e na ventilação natural (FONSECA, 2022).

A utilização da energia bioclimática é bastante acentuada em países em desenvolvimento, principalmente nas famílias abaixo da linha de pobreza. Um exemplo disso é o fogão solar, que é uma tecnologia simples e de baixo custo que utiliza a energia solar para cozinhar alimentos. Segundo Gonçalves (2022), a utilização do fogão solar é bastante acentuada principalmente em países como Índia, China, Paquistão, Nigéria, Uganda, Sudão, entre outros, inclusive no Brasil. A energia bioclimática é uma forma de aproveitar os recursos naturais de forma sustentável e com menor impacto ambiental, além de ser uma alternativa viável para a população de baixa renda (BONIFÁCIO et al., 2022).

## 2.1.4 Potencial na Bahia

De acordo com Cerqueira e Gomes (2019), o sul da Bahia apresenta um potencial significativo para geração de energia solar, com um valor médio de irradiação solar global de 4,2 kWh/m<sup>2</sup> por dia. Essa região apresenta condições extremamente favoráveis para aplicação e utilização de energia solar, sugerindo um grande potencial para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (Figura 1). Esse potencial pode ser um importante passo para a transição da matriz energética atual para uma mais sustentável, em consonância com as necessidades do meio ambiente.

Figura 4 – Média anual de irradiação global na Bahia.



Fonte: Bahia (2018).

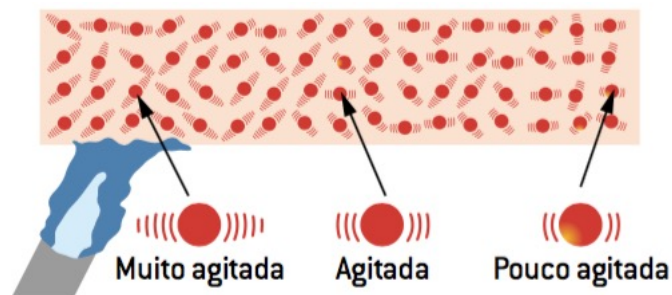
## 2.2 Transferência energética na cocção

De acordo com Cengel e Ghajar (2009), O calor, como forma de energia transferida de um sistema para outro devido a diferenças de temperatura, pode ocorrer de três maneiras distintas: condução, convecção e radiação. Em todos esses processos, é essencial que exista uma diferença de temperatura, e a transferência de calor sempre ocorrerá do meio com maior temperatura para o meio com menor temperatura.

### 2.2.1 Condução

A condução é um processo de transferência de energia térmica que ocorre quando partículas com maior vibração transferem calor para partículas vizinhas com menor energia térmica. Essa forma de transferência de calor pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e gases, a condução ocorre principalmente devido às colisões e à difusão das moléculas em seus movimentos aleatórios (CENGEL; GHAJAR, 2009).

Figura 5 – Exemplificação da condução térmica por condução.

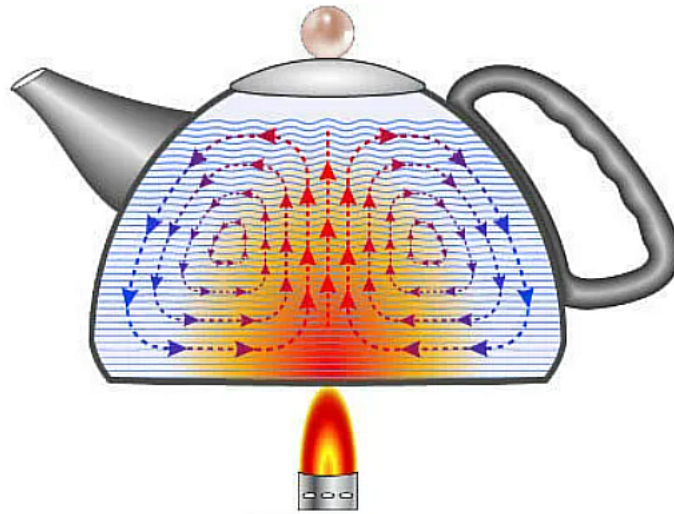


Fonte: Matos (2022).

### 2.2.2 Convecção

A convecção é o processo de transferência de energia que ocorre entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás) adjacente que está em movimento. Esse processo envolve os efeitos combinados de condução de calor e movimento do fluido. De acordo com Cengel e Ghajar (2009), a convecção pode ser categorizada em duas formas: convecção forçada e convecção natural (ou livre). A convecção forçada ocorre quando o fluido é induzido a mover-se na superfície por meio de forças externas, como o uso de bombas e ventiladores. Já a convecção natural acontece quando o movimento do fluido é impulsionado por variações de densidade resultantes das mudanças de temperatura no fluido.

Figura 6 – Transferência de calor por convecção.

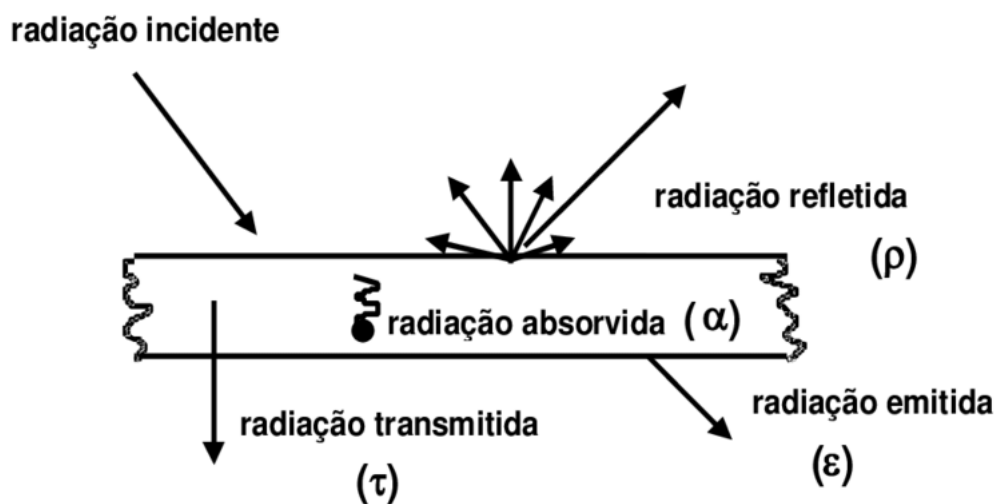


Fonte: Escola (2023).

### 2.2.3 Radiação

Segundo França (2021), a radiação térmica é um processo de transferência de energia que difere da convecção e condução, pois não requer um meio material para ocorrer. É mais eficaz quando ocorre no vácuo. De acordo com Incropera et al. (2000), a radiação térmica envolve a emissão de energia por parte da matéria que está a uma temperatura acima do zero absoluto. A quantidade de energia irradiada depende do poder emissivo de cada superfície, sendo que o poder emissivo máximo de um corpo é limitado pela Lei de Stefan-Boltzmann.

Figura 7 – Esquema de radiação incidente.



Fonte: Gate (2023).

## 2.3 Óptica

### 2.3.1 Reflexão

De acordo com Serway e Jr (2005), reflexão é o fenômeno que ocorre quando um raio de luz que percorre um meio encontra um limite com outro meio, e parte da luz incidente é refletida. Quando os raios refletidos estão paralelos uns aos outros, a direção de um raio refletido está em um plano perpendicular à superfície que contém o raio incidente, sendo chamada de reflexão especular. Quando a reflexão ocorre em uma superfície irregular, os raios são refletidos em diferentes direções e essa reflexão é chamada de reflexão difusa.

### 2.3.2 Refração

A refração é um fenômeno óptico que ocorre quando um raio de luz passa de um meio para outro meio com índice de refração diferente. Quando um raio de luz atinge a superfície de separação entre dois meios, parte da luz é refletida e parte é transmitida para o segundo meio. Ao passar para o segundo meio, a velocidade da luz muda e, conseqüentemente, sua direção também é alterada. Esse desvio na trajetória da luz é chamado de refração (SERWAY; JR, 2005).

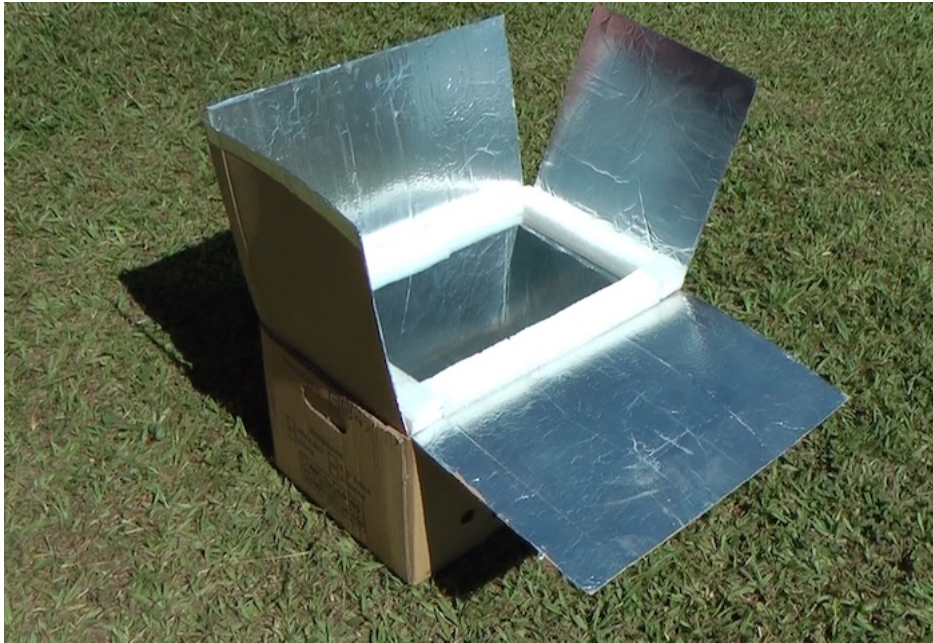
Segundo Serway e Jr (2005), ângulo de refração depende dos índices de refração dos meios envolvidos e do ângulo de incidência do raio de luz. Quando o raio de luz passa de um meio menos denso para um meio mais denso, ele sofre uma refração em direção à normal, ou seja, em direção à reta perpendicular à superfície de separação dos meios. Já quando o raio de luz passa de um meio mais denso para um meio menos denso, ele sofre uma refração afastando-se da normal. A refração é um fenômeno importante em diversas áreas, como na óptica, na física, na engenharia e na medicina.

## 2.4 Fogões solares

### 2.4.1 Fogão do tipo caixa

Um fogão do tipo caixa é um tipo de fogão solar que utiliza uma caixa isolada para reter ou capturar os raios do sol que são convertidos em calor. Para Mafra (2022) esse tipo de fogão é baseado no conceito de um forno tradicional moderno e é a variedade mais comum e popular de fogão solar. A caixa é geralmente feita de materiais isolantes, como papelão ou madeira compensada, e é revestida com um material refletivo, como papel alumínio. O fogão do tipo caixa é fácil de construir e pode ser feito com materiais simples e baratos, tornando-o uma opção acessível para pessoas que vivem em áreas rurais ou com recursos limitados.

Figura 8 – Fogão do tipo caixa.



Fonte: Faz (2022).

Para cozinhar alimentos em um fogão do tipo caixa, basta colocar a panela com os alimentos dentro da caixa e deixá-la exposta ao sol. Os raios solares são capturados pela caixa e convertidos em calor, que é retido dentro da caixa pelo material isolante. Ainda segundo Mafra (2022), o fogão do tipo caixa é capaz de cozinhar uma variedade de alimentos, desde arroz e feijão até carnes e legumes. Além disso, ele é uma opção sustentável e saudável para cozinhar alimentos, pois não emite gases tóxicos ou poluentes e não requer o uso de combustíveis fósseis.

#### 2.4.2 Fogão do tipo reflexivo

Um fogão do tipo reflexivo é um tipo de fogão solar que utiliza painéis refletivos para concentrar os raios do sol em uma panela ou recipiente de cozimento. Esse tipo de fogão é fácil de construir e requer menos investimento de tempo e dinheiro do que outros tipos de fogões solares. Geralmente, os painéis são feitos de materiais reciclados, como papelão, e são revestidos com materiais refletivos, como folha de alumínio ou filmes de poliéster metalizado Alberto et al. (2020).

Figura 9 – Fogão do tipo reflexivo.



Fonte: Alberto et al. (2020).

Para cozinhar alimentos em um fogão do tipo reflexivo, basta colocar a panela com os alimentos no ponto focal dos painéis refletivos. Os raios solares são refletidos pelos painéis e concentrados na panela, gerando calor suficiente para cozinhar os alimentos. Embora o fogão do tipo reflexivo seja capaz de cozinhar uma variedade de alimentos, ele tem uma potência menor do que outros tipos de fogões solares e a temperatura máxima é de cerca de 100°C. Por isso, o tempo de cozimento pode ser maior e é recomendado cobrir a panela com um saco plástico para forno ou um recipiente de vidro transparente para melhorar o desempenho. O fogão do tipo reflexivo é uma opção acessível e sustentável para cozinhar alimentos em áreas rurais ou com recursos limitados (Pereira Neto, 2021).

### 2.4.3 Fogão do tipo concentrador

Um fogão do tipo concentrador, também conhecido como fogão parabólico, é um tipo de fogão solar que utiliza um espelho parabólico para concentrar os raios do sol em um ponto focal. Esse tipo de fogão é capaz de gerar altas temperaturas e cozinhar alimentos rapidamente, tornando-o uma opção eficiente para cozinhar em áreas com muita luz solar. No entanto, o fogão do tipo concentrador é mais complicado de construir do que outros tipos de fogões solares, devido ao design e aos materiais necessários (Bessa Neto et al., 2019).

O espelho parabólico do fogão do tipo concentrador é feito de materiais refletivos, como vidro ou metal, e é projetado para refletir os raios do sol em um ponto focal. Esse ponto focal é onde a panela com os alimentos é colocada, e é onde a energia solar é convertida em calor para cozinhar os alimentos. O fogão do tipo concentrador é capaz de gerar temperaturas de até 300°C, o que é suficiente para cozinhar uma variedade de alimentos, desde carnes e legumes até pães e bolos (FERNANDES, 2019).

Figura 10 – Fogão do tipo concentrador.



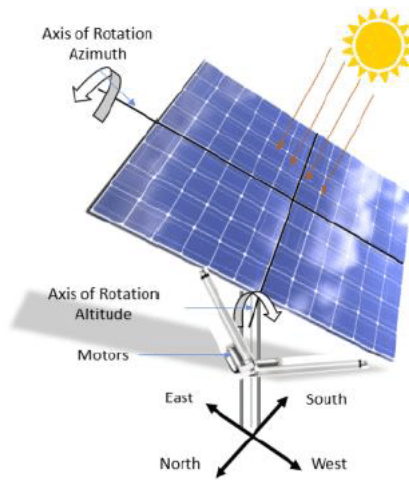
Fonte: Bessa Neto et al. (2019).

Uma das desvantagens do fogão do tipo concentrador é que ele requer uma orientação precisa em relação ao sol para funcionar corretamente. Qualquer desvio na orientação pode reduzir significativamente a eficiência do fogão, e a presença de nuvens pode impedir que o fogão funcione completamente. Além disso, o fogão do tipo concentrador é mais caro e mais difícil de construir do que outros tipos de fogões solares, o que pode limitar sua acessibilidade em áreas com recursos limitados. No entanto, para aqueles que têm acesso a materiais e recursos, o fogão do tipo concentrador pode ser uma opção eficiente e sustentável para cozinhar alimentos (MAFRA, 2022).

#### 2.4.4 Rastreador solar

O sistema de rastreamento solar é uma tecnologia que permite monitorar a posição do Sol durante sua trajetória, com o objetivo de maximizar a captação de energia solar. Essa tecnologia é amplamente utilizada em sistemas de geração de energia elétrica, aquecimento de água e sistemas integrados que atuam como aquecedores solares e módulos fotovoltaicos. O mecanismo de rastreamento deve ser confiável e capaz de seguir a trajetória do sol com precisão, garantindo a eficiência do sistema (AGOSTINHO, 2023).

Figura 11 – Rastreador solar.



Fonte: Ibrahimi et al. (2019).

Para Silva (2023), os sistemas de rastreamento solar podem ser classificados em dois tipos: de eixo único e de dois eixos. O sistema de eixo único é composto por um único eixo que permite o movimento de rotação em torno de um eixo fixo, enquanto o sistema de dois eixos permite o movimento de rotação em torno de dois eixos, permitindo uma maior precisão no rastreamento do sol. Além disso, os sistemas de rastreamento solar podem ser classificados como abertos ou fechados, dependendo do tipo de controle utilizado.

## 3 Metodologia

O processo de desenvolvimento de projeto envolveu cinco etapas, iniciando-se pela colagem do refletor, passando para a montagem da parabólica, confecção da estrutura, sistema de rastreamento e culminando por fim na montagem do equipamento. Para a realização destas etapas, foi necessário estabelecer os parâmetros construtivos para atender ao cenário proposto na pesquisa. O usuário, para compor o cenário, escolhido foi uma família formada por três indivíduos, residentes no território do médio Rio das Contas, localizado no semiárido baiano. A família vive em uma casa de alvenaria com quatro cômodos. Eles dependem diariamente de um fogão à lenha para cozinhar alimentos.

### 3.1 Descrição do Fogão

Durante a definição destes parâmetros, utilizando o cenário proposto, o escopo deste projeto foi delimitado pelo: a) tamanho da área destinada para a construção do projeto; b) custo do projeto acessível para uma família de baixa renda, incluindo fabricação e manutenção; c) facilidade de operação, visando ergonomia, economia de tempo e intuitividade; d) garantia da segurança, incluindo os riscos de queimaduras, intoxicação e explosão.

#### 3.1.1 Materiais Utilizados

A construção do fogão em questão, do tipo parabólico, foi realizada a partir de sucata de antena parabólica, vinil adesivo metalizado, segmentos de aço cortados e soldados. A parabólica tinha 1,3m de diâmetro, com área de reflexão solar em torno de  $1,32 \text{ m}^2$ . A Figura 12 mostra a antena parabólica usada na construção do fogão.

Figura 12 – parabólica usada na construção.



Fonte: (MUNDOMAX, 2023).

Foi utilizado um vinil adesivo metalizado para refletir os raios solares. O vinil foi colado na parte interna da antena parabólica. Na figura 13 (a) e (b) é possível observar o vinil adesivo metalizado e colado na parte interna da antena parabólica.

Figura 13 – Vinil adesivo metalizado.

(a) Vinil adesivo metalizado.



(b) Adesivo colado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a construção do equipamento, tivemos como base uma antena parabólica de chapa fechada, utilizada como concentrador, recoberta por vinil adesivo metalizado para reflexão. As chapas da antena foram fixados por parafusos e a estrutura confeccionada com tubos de aço.

### 3.1.2 Dimensões do Fogão

Para garantir a eficiência do fogão solar parabólico projetado para o cenário proposto, é essencial dimensionar corretamente o refletor parabólico. Para isso, três parâmetros são essenciais: a distância focal, o ângulo de borda e a área de reflexão.

A distância focal ( $F$ ) do refletor parabólico é a distância entre o foco e o vértice da parábola e pode ser calculada de acordo com a seguinte equação, proposta por Halliday et al. (2012):

$$F = \frac{D^2}{16H} \quad (1)$$

Onde:

$D$  é o diâmetro da parábola

$H$  é a profundidade da parábola

No caso do fogão solar parabólico em questão, o diâmetro da parábola é de 130 cm. A profundidade da parábola foi medida a partir do projeção de uma das partes da parabólica, resultando em 15 cm.

Substituindo esses valores na equação, obtemos uma distância focal de 70,41cm. Portanto, essa distância é suficiente para garantir que as radiações solares incidentes sejam refletidas em direção à região focal, onde a panela é colocada.

O ângulo de borda ( $\psi_{rim}$ ) é o ângulo formado entre o eixo focal e o eixo da parábola. Esse ângulo é importante para garantir que a radiação solar incidente seja refletida em direção à região focal. O ângulo de borda pode ser calculado pela equação 2:

$$\psi_{rim} = \arctan \frac{\frac{F}{D}}{2 \times \left(\frac{F}{D}\right)^2 - \frac{1}{8}} \quad (2)$$

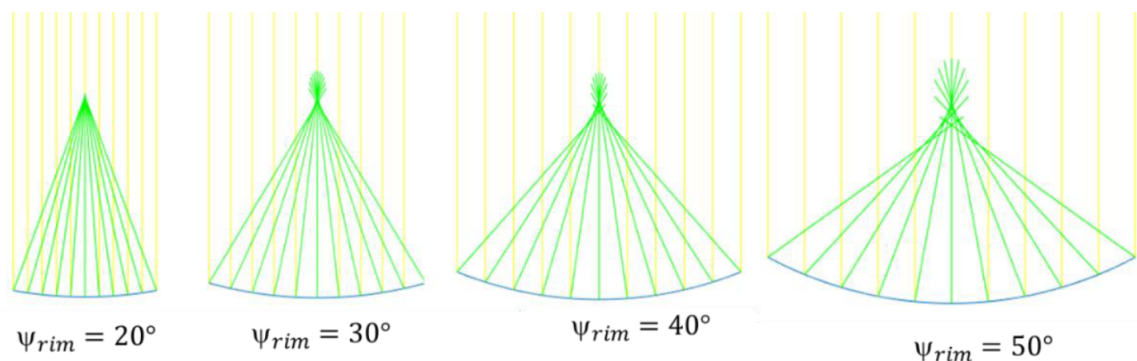
Onde:

D é o diâmetro da parábola

F é a distância focal

Substituindo os valores de F e D na equação, obtemos um  $\psi_{rim}$  de 49.55°. Um ângulo de borda muito pequeno fará com que os raios solares sejam refletidos para um ponto focal muito pequeno, o que pode reduzir a eficiência do fogão. Quanto maior o ângulo de borda os raios solares serão refletidos de forma mais difusa para um ponto focal, podendo dificultar o cozimento dos alimentos, como pode ser observado na figura 14. Com isso é possível afirmar que o ângulo de borda da parabólica converge para garantir que as radiações solares sejam refletidas em direção à região focal.

Figura 14 – Focalização de feixes de radiação paralelos em espelhos cilíndricos com diferentes ângulos de borda.



Fonte: (MOREIRA et al., 2018)

A área da superfície refletora também é um parâmetro importante. Uma área de superfície refletora maior produz mais calor, o que é necessário para cozinhar alimentos de forma eficiente.

A área da superfície refletora pode ser calculada pela equação 3:

$$A_{refletora} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

Substituindo o valor de D na equação, obtemos uma área de superfície refletora de 1.32  $m^2$ .

A Tabela 1 mostra as dimensões da parabólica.

Tabela 1 – Dimensões da parabólica.

DADOS	VALORES
<b>Diâmetro do Refletor</b>	1.3m
<b>Área de refletora</b>	1.32 $m^2$
<b>Distância Focal</b>	0.70m
<b>Profundidade</b>	0.15m
<b>Ângulo de Borda</b>	49.55°

Fonte: Autoria própria (2023).

## 3.2 Processo de fabricação e montagem do fogão solar

O equipamento foi construído no Instituto Federal da Bahia. No processo de fabricação do fogão solar, foi necessário realizar a colagem do material refletor, a montagem da parabólica, a confecção da estrutura e a montagem do equipamento.

### 3.2.1 Colagem do material refletor

O primeiro passo para a construção do fogão solar foi a colagem do material refletor. Para isso, como dito anteriormente, foi utilizado um vinil adesivo metalizado colado na parte interna do paraboloide. Na figura 13 (b) é possível observar o vinil adesivo colado na parte interna da antena parabólica.

### 3.2.2 Parabólica montada

Após a colagem do material refletor, foi feita a montagem da parabólica. Para isso, foi necessário unir as partes da parabólica utilizando parafusos, conforme podemos ver na figura 15.

Figura 15 – Montagem da parabólica.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.2.3 Confeção da estrutura

A estrutura do fogão solar foi feita utilizando tubos de aço. Essa estrutura foi projetada para garantir a sustentação e a articulação do refletor parabólico, permitindo que o mesmo seja movimentado de acordo com a posição solar. A estrutura foi construída com base retangular, garantindo a estabilidade do fogão. A figura 16 mostra a estrutura do fogão solar.

Figura 16 – Estrutura do fogão solar.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.2.4 Montagem do equipamento sem o sistema de rastreamento solar

Após a confecção da estrutura, foi feita a montagem do equipamento. Para isso, foi necessário fixar a parabólica na estrutura utilizando o suporte da mesma e calibrando o ponto focal, conforme figura 17.

Figura 17 – Montagem do equipamento.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.3 Sistema de Rastreamento Solar

Para garantir o alinhamento adequado do fogão solar parabólico com a posição solar, foi desenvolvido um sistema de rastreamento ativo composto por um sensor de posicionamento solar e um mecanismo de atuação. O desenvolvimento do sistema de rastreamento solar foi realizado em etapas. Inicialmente, foi feita uma pesquisa bibliográfica para entender o funcionamento de um sistema de rastreamento solar. Em seguida, foram analisados os tipos de sistema para definir o que seria utilizado. Após a definição do tipo de sistema, foi feito o dimensionamento do mesmo. Por fim, foi feita a montagem e testes.

#### 3.3.1 Pesquisa Bibliográfica

Nesta etapa, foi considerado a referência de Tharamuttam e Ng (2017), que realizaram uma comparação de diferentes sistemas de rastreamento ativos, passivos e híbridos para aplicações fotovoltaicas. A partir dessa análise, avaliamos os critérios de eficiência, simplicidade e viabilidade, levando em conta as necessidades e requisitos do projeto para a escolha da técnica de rastreamento MPPT (Maximum Power Point Tracking) mais adequada, visando otimizar a captura de energia solar ao longo do dia, maximizando o desempenho e a eficiência do sistema.

Uma vez que a incidência dos raios solares varia ao longo do dia, o ponto de máxima incidência solar também se desloca. Portanto, é necessário utilizar técnicas que permitam o rastreamento desse ponto para otimizar a captação de energia solar. Neste contexto, três métodos amplamente utilizados são comparados: o Perturb and Observe (P&O), sensores LDR (Light Dependent Resistor) e rastreamento cronológico. O método P&O é simples e de baixo custo, mas apresenta oscilações e desalinhamento em sombreamentos parciais. Os sensores LDR permitem um rastreamento preciso, mas aumentam a complexidade e requerem calibração. O rastreamento cronológico é simples e não requer sensores, mas pode não ser tão preciso.

Tabela 2 – Comparação entre técnicas de rastreamento.

<b>Técnica</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Simplicidade</b>	<b>Viabilidade</b>
<b>Perturb and Observe</b>	Média	Alta	Alta
<b>Sensores LDR</b>	Alta	Média	Média
<b>Rastreamento Cronológico</b>	Baixa	Alta	Alta

Fonte: Autoria própria (2023).

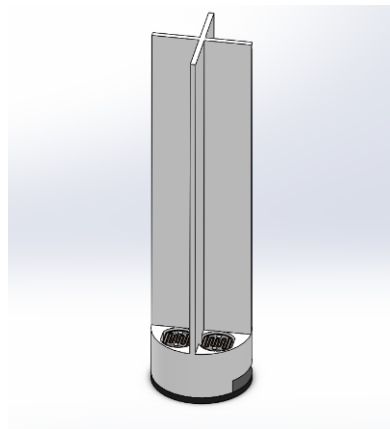
#### 3.3.2 Projeto e Montagem do Sistema

O sistema de rastreamento é composto por sensores e atuadores responsáveis por movimentar o refletor de acordo com as variações da posição solar. Essa funcionalidade permite manter o alinhamento entre o refletor e os raios solares, maximizando a captura de energia solar ao longo do dia.

Para garantir a função de rastreamento solar no fogão, foi utilizado um sensor de posicionamento solar composto por um conjunto de quatro LDRs montados na base do sensor, conforme podemos visualizar na Figura 18 (a) e (b). Esses LDRs foram fixados em furos de 5,0mm localizados no vértice da base do sensor de forma perpendicular à torre divisora. Essa disposição permite que, quando o ângulo de incidência dos raios solares apresentar um erro superior a  $2,3^\circ$ , o sensor fique completamente sombreado, o que indica a necessidade de correção no posicionamento da parábola (THARAMUTTAM; NG, 2017).

Figura 18 – Sensor de posicionamento solar.

(a) Representação 3D do sensor de luminosidade.



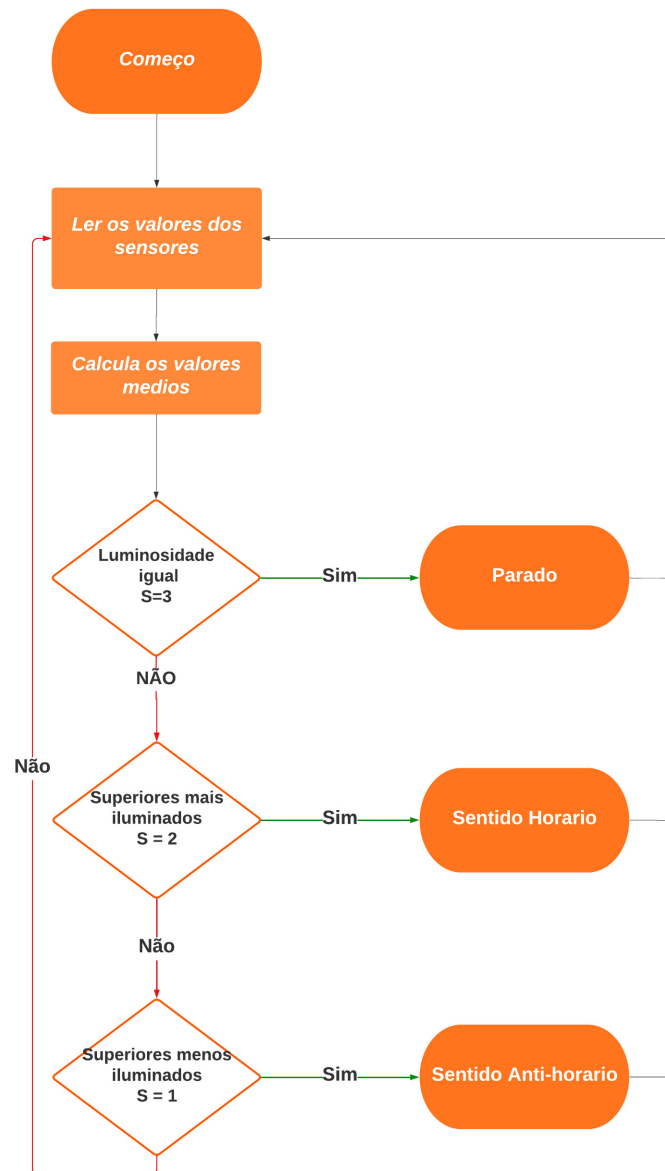
(b) Sensor instalado



Fonte: A autoria própria (2023).

Para o controle do sistema de rastreamento, foi utilizado um microcontrolador ESP8266, que é um microcontrolador de baixo custo e baixo consumo de energia. O microcontrolador foi programado para receber os dados do sensor de posicionamento solar e acionar o motor de corrente contínua para realizar a movimentação do refletor. O diagrama de fluxo de operação do microcontrolador pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de fluxo de operação do microcontrolador.



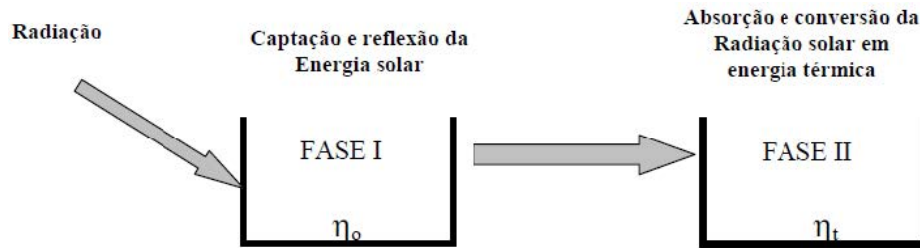
Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.4 Eficiência de um fogão solar

A eficiência de um fogão solar é definida como a razão entre a energia solar incidente e a energia térmica gerada. Essa eficiência depende de vários fatores, como a área do concentrador, a temperatura do ar ambiente, a temperatura da panela e a temperatura do alimento. Além disso, a eficiência de um fogão solar também depende do tipo de fogão utilizado, sendo que os fogões do tipo caixa apresentam uma eficiência menor do que os fogões do tipo concentrador.

O processo de conversão de energia solar em energia térmica pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Processo de conversão de energia solar em energia térmica.



Fonte: Alberto et al. (2020).

Conforme mostrado na Figura 20, é possível notar que a primeira fase do processo de conversão depende da eficiência ótica ( $\eta_o$ ). Dependendo do material e precisão que é construído o concentrador a eficiência ótica representa uma variável limitadora no resultado, juntamente com a eficiência térmica ( $\eta_t$ ) na segunda fase do processo de conversão. Outro fator que influencia na eficiência do fogão solar é a temperatura do ar ambiente, que pode ser influenciada pela velocidade do vento e pela temperatura ambiente, que por sua vez, é influenciada pela radiação solar incidente e essa radiação é dada em função da localização geográfica, da época do ano e das condições climáticas.

A eficiência de um fogão solar pode ser calculada pela equação 4:

$$\eta_u = \eta_o \times \eta_t \quad (4)$$

Onde:

$\eta_u$  - Eficiência do fogão solar

$\eta_o$  - Eficiência ótica

$\eta_t$  - Eficiência térmica

A potência absorvida pela panela pode ser calculada pela equação 5:

$$P_{abs} = I_c \times A_u \times \rho \times K_{rd} \times a_p \quad (5)$$

Onde:

$I_c$  - Radiação instantânea coletada pelo sistema de captação de energia solar (W/m<sup>2</sup>)

$A_u$  - área útil do concentrador. (m<sup>2</sup>)

$\rho$  - refletividade do concentrador (%)

$K_{rd}$  - fração da radiação refletida que é absorvida pela panela (%)

$a_p$  - absorvidade da panela (%)

$P_{abs}$  - potência máxima absorvida pela panela (W)

A potência de perda pode ser calculada pela equação 6:

$$P_{perda} = H_{ce} \times A_{lp} \times (T_p - T_a) \quad (6)$$

Onde:

$H_{ce}$  – coeficiente de convecção entre a superfície externa da panela e o ar ambiente. (W/m<sup>2</sup>. °C)

$A_{lp}$  – área lateral da panela (m<sup>2</sup>)

$T_p$  – temperatura externa da panela (°C)

$T_a$  – temperatura ambiente (°C)

O coeficiente de convecção é dado pela equação 7:

$$H_{ce} = \frac{K_{ar}}{L} \times C_k \times R_{aL}^n \quad (7)$$

Onde:

$K_{ar}$  – condutividade térmica do ar (W/m<sup>2</sup>. °C)

$L$  – altura da panela

$R_{aL}^n$  - Numero de Rayleigh

O coeficiente  $C_k$  e o expoente  $n$  dependem do intervalo do número de Rayleigh, sendo que: para  $n = 1/4$  o escoamento é laminar e para  $n = 1/3$  o escoamento é turbulento.

O coeficiente de convecção também pode ser encontrado pela equação 18:

$$H_{ce} = 2.8 \times 3V_v \quad (8)$$

Onde:

$V_v$  – velocidade do vento (m/s)

A potência útil é dada pela equação 9:

$$P_{util} = P_{abs} - P_{perda} \quad (9)$$

A eficiência óptica é dada pela equação 10:

$$\eta_o = \rho \times K_{rd} \times a_p \quad (10)$$

A eficiência térmica é dada pela equação 11:

$$\eta_t = \frac{Q_u}{P_{abs}} \quad (11)$$

Onde:

$Q_u$  – calor útil (J)

O calor útil é dado pela equação 12:

$$Q_u = m \times c_p \times (T_{pf} - T_{pi}) \quad (12)$$

Onde:

$m$  – massa (kg)

$c_p$  – calor específico (J/kg. °C)

$T_{pf}$  – temperatura final (°C)

$T_{pi}$  – temperatura inicial (°C)

A temperatura de um corpo situado no foco do concentrador depende da densidade de fluxo na imagem de Gauss sendo, portanto, governada pela Lei de Stefan-Boltzmann. A temperatura da panela pode ser calculada pela equação 13:

$$E = C \times P_{abs} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (13)$$

Onde:

$E$  – energia irradiada (W)

$C$  – Fator de concentração solar

$\varepsilon$  – emissividade

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann

$T$  – temperatura absoluta (K)

O fator de concentração solar é dado pela equação 14:

$$C = \frac{A_u}{A_r} \quad (14)$$

Onde:

$A_u$  – área útil do concentrador (m<sup>2</sup>)

$A_r$  – área iluminada da panela (m<sup>2</sup>)

A temperatura teórica pode ser calculada pela equação 15:

$$T = \sqrt[4]{\frac{C \times P_{abs}}{\varepsilon \times \sigma}} \quad (15)$$

### 3.5 Ajustes finais

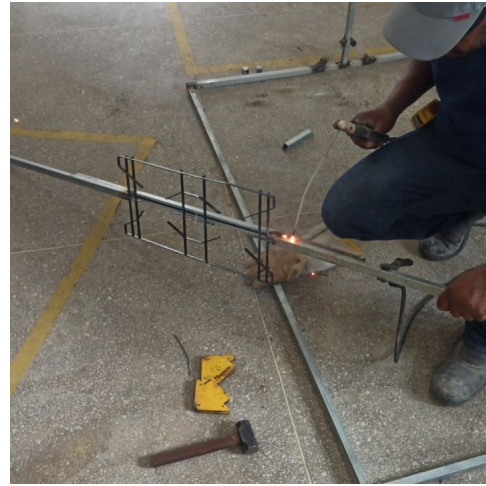
Após a montagem do fogão solar, foram realizados ajustes para garantir o funcionamento adequado do equipamento. Para um melhor funcionamento do fogão solar, o ponto focal da parabólica deve estar alinhado com o fundo da panela utilizada. Gerando assim, uma maior eficiência do equipamento. Para isso, foi necessário fazer um suporte do concentrador ajustável. Além disso, foi necessário ajustar a estrutura de sustentação, com a soldagem de um tubo de aço, para garantir que a mesma suportasse o peso da panela e do concentrador. A figura 21 (a) e (b) mostra os ajustes realizados.

Figura 21 – Ajustes realizados.

(a) Suporte da panela.



(b) Estrutura de suporte ajustado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os ensaios foram realizados nos meses de novembro e dezembro de 2023, no Laboratório de Processos de Fabricação do Instituto Federal da Bahia, no município de Jequié-BA, no período das 10h às 13 horas, afim de proporcionar uma maior incidência de radiação solar no equipamento.

### 3.6 Metodologia dos ensaios

Os ensaios foram realizados com o fogão solar parabólico em duas posições: com o rastreamento solar ativado e com o rastreamento solar desativado. Em todos os ensaios os procedimentos realizados envolveram o posicionamento do ponto focal alinhado com o fundo da panela, o posicionamento da panela no ponto focal do concentrador solar, o preenchimento da panela com 1 litro de água, a definição de pontos de medição de temperatura na panela, na água e no ponto focal, a definição do tempo de ensaio de 40 minutos, a definição do intervalo de medição de temperatura de 20 em 20 minutos e a definição de uma quantidade de 3 medições para cada ponto de medição em cada intervalo de tempo, (Figura 22). A panela de pressão

utilizada nos ensaios foi escolhida por ter sido utilizada em outro estudo sobre fogão solar e está disponível no laboratório.

Além disso, alguns parâmetros foram definidos para garantir a confiabilidade dos dados coletados. Os parâmetros definidos foram: Controláveis e Não-controláveis.

### 3.6.1 Parâmetros Controláveis

Os parâmetros controláveis são aqueles que podem ser controlados pelo operador do equipamento. Os parâmetros definidos foram o posicionamento do concentrador, a coleta de dados e o intervalo de medição de temperatura.

### 3.6.2 Parâmetros Não-controláveis

Os parâmetros não-controláveis são mensuráveis mas não podem ser controlados. A exemplo disso, temos a radiação solar incidente no equipamento. Esses parâmetros não-controláveis foram definidos como sendo a própria radiação solar incidente no equipamento, a temperatura ambiente, a velocidade do vento e as condições climáticas.

Figura 22 – Ensaio realizado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os testes foram realizados com o auxílio de um termômetro infravermelho, (Figura 23), que foi utilizado para medir a temperatura da panela, da água e do ponto focal conforme mostra a figura 24.

Figura 23 – Termômetro infravermelho.



Fonte: Autoria própria (2023).

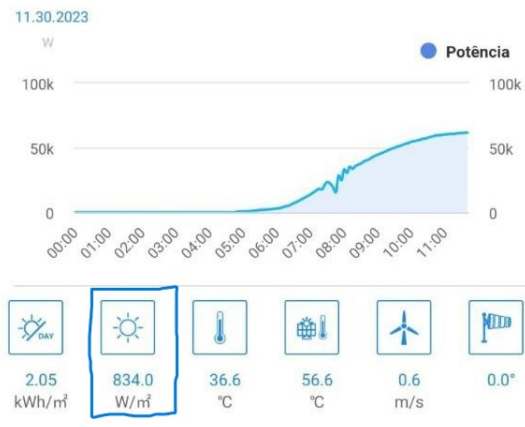
Figura 24 – Medição de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2023).

Também foi utilizado o radiômetro, que acompanha a estação meteorológica presente no IFBA - Campus Jequié, para medir a radiação solar incidente no equipamento. A figura 25 mostra a medição de radiação solar incidente no equipamento.

Figura 25 – Medição de radiação solar.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.6.3 Ensaios com o rastreamento solar

Os ensaios com o rastreamento solar ativado não foram realizados devido às condições climáticas adversas. Os dias estavam nublados e chuvosos, o que impossibilitou a realização de medidas precisas de temperatura e radiação solar incidente no equipamento.

A luz solar é um dos principais fatores que afetam o desempenho de um fogão solar. Em dias nublados, a quantidade de radiação solar incidente é menor, o que reduz a temperatura da água e do ponto focal do concentrador. Além disso, a chuva pode causar perdas de energia térmica, o que também afeta o desempenho do fogão solar. Portanto, os ensaios foram realizados apenas com o rastreamento solar desativado.

Com a impossibilidade de realizar os ensaios com o rastreamento solar ativado, os resultados podem ser gerados utilizando métodos teóricos e semiteóricos. No estudo em questão foi utilizado a regressão linear múltipla para gerar os resultados teóricos de eficiência térmica. A regressão linear múltipla é um método estatístico que permite estimar a relação entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes. A equação 16 mostra o padrão de equação da regressão linear múltipla.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (16)$$

Onde:

$y$  - variável dependente

$\beta_0$  - intercepto

$\beta_1$  - coeficiente de regressão

$x_1$  - variável independente

$\beta_2$  - coeficiente de regressão

$x_2$  - variável independente

$\beta_3$  - coeficiente de regressão

$x_3$  - variável independente

A partir da equação 16, podemos estimar a equação de eficiência térmica do fogão, relacionando a mesma com a incidência de radiação solar, a temperatura ambiente e a temperatura do ponto focal na panela. A equação 17 mostra a equação de eficiência térmica do fogão solar.

$$\eta_t = \beta_0 + \beta_1 I_c + \beta_2 T_a + \beta_3 T_{pf} \quad (17)$$

Onde:

- $\eta_t$  - Eficiência térmica
- $I_c$  - Intensidade de radiação solar incidente no equipamento
- $T_a$  - Temperatura ambiente
- $T_{pf}$  - Temperatura do ponto focal na panela

Os coeficientes de regressão  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  representam:

- $\beta_0$  - o valor de  $\eta_t$  quando  $I_c$ ,  $T_a$  e  $T_{pf}$  são iguais a zero.
- $\beta_1$  - o efeito da intensidade da radiação solar incidente sobre  $\eta_t$
- $\beta_2$  - o efeito da temperatura ambiente sobre  $\eta_t$
- $\beta_3$  - o efeito da temperatura do ponto focal na panela sobre  $\eta_t$

Para se obter o valor de  $\eta_t$  para um determinado valor de  $I_c$ ,  $T_a$  e  $T_{pf}$  é necessário calcular os coeficientes de regressão  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ . Esses coeficientes foram ser calculados utilizando a biblioteca *statsmodel*. A escolha da biblioteca para calcular os coeficientes de regressão foi feita por ser robusta e fácil de usar para realizar análise de regressão linear. O código 3.1 mostra a programação utilizada para calcular os coeficientes de regressão.

Listing 3.1 – Calculo dos coeficientes de regressão.

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import statsmodels.formula.api as sm

data = pd.read_csv('dados.csv', sep=';', encoding='utf-8', header=0
```

```

data["Ic"] = data["Ic"].replace(",", ".", regex=True).astype(float)
data["Ta"] = data["Ta"].replace(",", ".", regex=True).astype(float)
data["Tp"] = data["Tp"].replace(",", ".", regex=True).astype(float)
data["Ef"] = data["Ef"].replace(",", ".", regex=True).astype(float)

% Separate the independent and dependent variables

x = data[["Ic", "Ta", "Tp"]]
y = data["Ef"]

% Criar o modelo de regressao linear multipla com statsmodels
modelo = sm.ols(formula='Ef~Ic+Ta+Tp', data=data)
modelo = modelo.fit()

% Obter os coeficientes do modelo
a = modelo.params.iloc[0]
b1 = modelo.params.iloc[1]
b2 = modelo.params.iloc[2]
b3 = modelo.params.iloc[3]

print(f"a_{a:.7}")
print(f"b1_{b1:.4}")
print(f"b2_{b2:.6}")
print(f"b3_{b3:.4}")

% Get the coefficient of determination (R^2)
r_squared = modelo.rsquared
print(f"R^2_{r_squared}")

% Obter eficiencia para Ic = 841, Ta = 35.4 e Tp = 120.7
Ic = 834
Ta = 35.4
Tp = 120.7
Ef = a + b1*Ic + b2*Ta + b3*Tp
print(f"Ef_{Ef:.4}")

% Obter erro padr~{a}o
std_error = modelo.bse

```

```

print(f"Erro_padr\~{a}o_\={std_error}")

% Obter sumario do modelo
print(modelo.summary())

% Get confidence interval for the coefficients
print(modelo.conf_int(alpha=0.05, cols=None))

```

A biblioteca oferece uma variedade de funções para realizar análise de regressão linear, incluindo a função `ols()`, que pode ser usada para calcular os coeficientes de regressão usando o método dos mínimos quadrados ordinários. A função `ols()` requer dois argumentos: uma fórmula e um *dataframe*. A fórmula é uma string que descreve a variável dependente e as variáveis independentes. O *dataframe* é um objeto que contém os dados que serão usados para calcular os coeficientes de regressão. A função `ols()` retorna um objeto que contém os coeficientes de regressão e outras informações sobre a regressão linear. A função `summary()` pode ser usada para imprimir os coeficientes de regressão e outras informações sobre a regressão linear.

A precisão da regressão linear múltipla pode ser avaliada utilizando o coeficiente de determinação  $R^2$  e o erro padrão. O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida de quão bem os valores observados são previstos pelo modelo. O coeficiente de determinação  $R^2$  é calculado pela equação 18:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (18)$$

Onde:

$SS_{res}$  - Soma dos quadrados dos resíduos

$SS_{tot}$  - Soma dos quadrados totais

Na biblioteca *statsmodel* do *Python*, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi calculado utilizando a função `rsquared`. A função `rsquared()` requer um argumento: o tipo de coeficiente de determinação  $R^2$  que será calculado. O tipo de coeficiente de determinação  $R^2$  pode ser "bruto", "padronizado" ou "ajustado".

O erro padrão é uma medida de quão bem os valores observados são previstos pelo modelo. O erro padrão é calculado pela equação 19:

$$SE = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n - 2}} \quad (19)$$

Onde:

$SS_{res}$  - Soma dos quadrados dos resíduos

$n$  - Número de observações

## 4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na construção e nos ensaios realizados com o fogão solar parabólico. Os ensaios foram realizados no IFBA - Campus Jequié, entre as 10h e as 13h, nos meses de novembro e dezembro de 2023.

### 4.1 Resultados da construção do fogão solar

#### 4.1.1 Parabólica

A parabólica foi construída utilizando uma antena parabólica de 1.3m de diâmetro e 0.15m de profundidade. A parabólica foi revestida com vinil adesivo metalizado, que foi colado na parte interna da antena parabólica. A figura 26 mostra a parabólica revestida com vinil adesivo metalizado.

Figura 26 – Parabólica revestida com vinil adesivo metalizado.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 4.2 Ensaios realizados

Os mesmos foram realizados com o rastreamento solar desativado, visando avaliar a eficiência do fogão solar parabólico. Além das configurações bi-focal e mono-focal.

### 4.2.1 Configuração Bi-focal

Durante a montagem foi observado que o peso da parabólica fazia com que a mesma ficasse em um formato elíptico, dividindo assim, a energia solar em dois pontos focais. Com isso os testes foram realizados utilizando os dois pontos focais. A figura 27 mostra a parabólica em formato elíptico.

Figura 27 – Parabólica em formato elíptico.



Fonte: Autoria própria (2023).

O primeiro ensaio com o rastreamento solar desativado. A fim de avaliar a eficiência do fogão no cozimento de alimentos, foram coletados dados de temperatura em 6 pontos diferentes, (1)Ponto focal na chapa; (2)superfície da chapa; (3)Lateral da panela; (4)Ponto focal na panela; (5)parede interna da panela; (6)água, além da radiação solar incidente. Os dados coletados podem ser vistos na tabela 3.

Tabela 3 – Dados coletados no ensaio 1.

Ponto	12h	12h20	12h40
1	77,3°C	100,5°C	102,3°C
2	38,1°C	34,5°C	39°C
3	44,5°C	48°C	43.3°C
4	93,5°C	76,5°C	99,5°C
5	43°C	47,7°C	46°C
6	45°C	46°C	49°C

Fonte: Autoria própria (2023).

No dia que foi realizado o ensaio, as condições climáticas estavam favoráveis para a realização do mesmo, com céu limpo e sem nuvens fornecendo maior credibilidade aos dados coletados. A radiação solar incidente no dia foi de  $840 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.2.2 Configuração Mono-focal

O segundo ensaio foi realizado ainda com o rastreamento solar desativado. Após ajustes na parabólica, foi possível observar que a mesma estava em um formato circular, gerando assim, um único ponto focal. Com isso as medições foram realizadas apenas nos pontos (1) ponto focal; (2) lateral inferior da panela; (3) lateral superior da panela; (4) água. Os dados coletados podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4 – Dados coletados no ensaio 2.

Ponto	11h20	11h40	12h
1	95°C	148,3°C	120,7°C
2	77°C	59,7°C	78,3°C
3	52,3°C	43°C	44,3°C
4	38,3°C	45,3°C	51°C

Fonte: Autoria própria (2023).

No dia que foi realizado o ensaio, as condições climáticas estavam favoráveis para a realização do mesmo, com céu limpo e sem nuvens. A radiação solar incidente no dia foi de  $834 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.2.3 Comparação entre os ensaios

A partir dos dados coletados nos ensaios, foi possível comparar a eficiência do fogão solar parabólico com configuração bi e mono-focal. No primeiro ensaio, as temperaturas se mostraram mais baixas do que no segundo ensaio, isso ocorreu devido a configuração bi-focal do fogão solar, que gerou dois pontos focais, dividindo assim, a energia solar em dois pontos. Com isso, a energia solar incidente em cada ponto focal foi menor do que a energia solar incidente no ponto focal do fogão solar com configuração mono-focal.

A tabela 5 mostra a diferença entre as temperaturas coletadas nos dois ensaios.

Tabela 5 – Comparação entre os ensaios.

Ponto	Ensaio 1	Ensaio 2	Diferença
Ponto focal	99,5°C	120,7°C	21,2°C
2	39°C	78,3°C	39,3°C
3	43,3°C	44,3°C	1°C
4	99,5°C	51°C	48,5°C

Fonte: Autoria própria (2023).

### 4.3 Eficiência do fogão solar

A eficiência do fogão solar foi calculada utilizando a equação 4. Para isso, foi necessário calcular a potência absorvida pela panela, a potência de perda, a potência útil, a eficiência óptica

e a eficiência térmica.

### 4.3.1 Eficiência na configuração bi-focal

Usando o equacionamento apresentado anteriormente, calcularam-se os parâmetros que diagnostica a eficiência do equipamento na configuração bi-focal conforme procedimento abaixo:

#### 1. Potência térmica absorvida pela panela:

Utilizando a equação 5, foi possível calcular a máxima potência absorvida pela panela, com os seguintes parâmetros:

- $\rho = 0,95$  - refletividade do concentrador (%);
- $K_{rd} = 0,9$  - fração da radiação refletida que é absorvida pela panela (%);
- $a_p = 0,9$  - absorvidade da panela (%);
- $I_c = 841W/m^2$  - Radiação instantânea coletada pelo sistema de captação de energia solar ( $W/m^2$ );
- $A_u = 0,66m^2$  - área útil de metade do concentrador. ( $m^2$ );

Substituindo os valores na equação, temos:

$$P_{abs} = I_c \times A_u \times \rho \times K_{rd} \times a_p$$

$$P_{abs} = 429,48W$$

#### 2. Potência Util:

A potência útil é dada pela equação 9, onde os valores da perda é calculado através da equação 6. Para isso, foi necessário calcular o coeficiente de convecção, utilizando a equação 18, onde  $V_v$  é a velocidade do vento. A velocidade do vento foi de  $2,9m/s$ . Com isso, foi possível calcular o coeficiente de convecção,  $H_{ce} = 24.36W/m^2.K$ . Substituindo, temos:

$$P_{perda} = H_{ce} \times A_{tp} \times (T_p - T_a)$$

onde:

- $H_{ce} = 24.36W/m^2.K$  – coeficiente de convecção entre a superfície externa da panela e o ar ambiente. ( $W/m^2.K$ );
- $T_p = 99,5C$  – temperatura externa da panela ( $C$ );
- $T_a = 36,5C$  – temperatura ambiente ( $C$ );

- $A_{lp} = 0,12m^2$  – área lateral da panela (m<sup>2</sup>);

$$P_{perda} = 187,377W$$

Substituindo os valores na equação 9, temos:

$$P_{util} = P_{abs} - P_{perda}$$

$$P_{util} = 429,48W - 187,37W = 242,111W$$

### 3. Fator de concentração

O fator de concentração solar é dado pela equação 14, onde  $A_u$  é a área útil do concentrador e  $A_r$  é a área iluminada da panela. Para isso, foi necessário calcular a área iluminada da panela, utilizando a equação 3, onde  $D_p$  é o diâmetro da panela. O diâmetro da panela foi de  $0,15m$ . Com isso, foi possível calcular a área iluminada da panela,  $A_r = 0,018m^2$ . Substituindo, temos:

$$C = \frac{A_u}{A_r}$$

$$C = \frac{0,66}{0,018}$$

Resultando em  $C = 37,6$

Foram calculadas as eficiências no processo de conversão da energia eletromagnética em energia térmica, sejam elas a eficiência óptica, térmica e útil do fogão solar.

### 4. Eficiência óptica

$$\eta_o = \rho \times K_{rd} \times a_p$$

$$\eta_o = 0,95 \times 0,9 \times 0,9$$

Resultando em  $\eta_o = 0,77$

### 5. Eficiência térmica

$$\eta_t = \frac{Q_u}{P_{abs}}$$

$$\eta_t = \frac{242,111}{429,48}$$

Resultando em  $\eta_t = 0,56$

### 6. Eficiência do fogão solar

$$\eta_u = \eta_o \times \eta_t$$

$$\eta_u = 0,77 \times 0,56$$

Resultando em  $\eta_u = 0,43$

Os valores obtidos demonstram que o fogão solar apresenta uma eficiência de 43% na configuração bi-focal.

## 7. Temperatura teórica

A temperatura teórica é dada pela equação 15, onde segue:  $T = \sqrt[4]{\frac{C \times P_{abs}}{\varepsilon \times \sigma}}$

$$T = \sqrt[4]{\frac{37,6 \times 425,9}{0,9 \times 5,67 \times 10^{-8}}}$$

Resultando em  $T = 475,23C$

A temperatura teórica máxima obtida foi de 475,23°C, enquanto a temperatura máxima obtida no ensaio foi de 99,5°C. A diferença entre as temperaturas se deve ao fato de que a temperatura teórica é calculada com base na radiação solar incidente no equipamento, enquanto a temperatura obtida no ensaio é calculada com base na radiação solar incidente no ponto focal do equipamento. Além disso, a temperatura teórica é calculada com base na eficiência do equipamento, que é menor do que 100%, devido a perdas de energia durante o processo de conversão da energia eletromagnética em energia térmica.

### 4.3.2 Eficiência na configuração mono-focal

Com os dados coletados no ensaio 2, foi possível calcular a eficiência do fogão solar na configuração mono-focal. Para isso, foi necessário calcular os mesmos dados da configuração anterior.

#### 1. Potência termica absorvida pela panela:

$$P_{abs} = 851.827W$$

#### 2. Potência Util:

$$P_{perda} = 38.768W$$

$$P_{util} = 851.827W - 38.768W = 813.059W$$

#### 3. Fator de concentração

$$C = \frac{A_u}{A_r}$$

$$C = \frac{1,32}{0,018}$$

Resultando em  $C = 75,1$

#### 4. Eficiência óptica

$$\eta_o = 0,77$$

#### 5. Eficiência térmica

$$\eta_t = 0,939$$

#### 6. Eficiência do fogão solar

$$\eta_u = 0,77 \times 0,939$$

$$\text{Resultando em } \eta_u = 0,723$$

Os valores obtidos demonstram que o fogão solar apresenta uma eficiência de 72.3% na configuração mono-focal.

#### 7. Temperatura teórica

$$T = \sqrt[4]{\frac{75,1 \times 851,827}{0,9 \times 5,67 \times 10^{-8}}}$$

$$\text{Resultando em } T = 785C$$

A temperatura teórica máxima obtida foi de 785°C, enquanto a temperatura máxima obtida no ensaio foi de 120,7°C. É perceptível que a temperatura teórica para a configuração mono-focal é maior do que a temperatura teórica para a configuração bi-focal, isso ocorreu devido a maior radiação solar incidente no ponto focal do equipamento, que gerou uma maior temperatura no ponto focal. A eficiência do equipamento também influenciou na temperatura teórica, pois a eficiência do equipamento na configuração mono-focal é maior do que a eficiência do equipamento na configuração bi-focal.

### 4.3.3 Comparação entre as eficiências

A partir dos dados coletados nos ensaios, foi possível comparar a eficiência do fogão solar parabólico com configuração bi e mono-focal. No primeiro ensaio, a eficiência do fogão solar foi de 43%, enquanto no segundo ensaio, a eficiência do fogão solar foi de 72.3%. A tabela 6 mostra a diferença entre as eficiências dos dois ensaios.

Tabela 6 – Comparação entre as eficiências.

<b>Eficiência</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Diferença</b>
<b>Eficiência</b>	43%	72.3%	29.3%

Fonte: Autoria própria (2023).

## 4.4 Rastreamento solar

Como mencionado anteriormente, os testes com o rastreador solar não foram realizados devido a condições climáticas desfavoráveis. Porém, foi possível observar que o rastreador solar se mostrou eficiente, pois o mesmo acompanhou a posição solar durante o dia.

A ausência dos testes com o rastreador solar dificulta a comparação da eficiência do fogão solar com rastreador e sem rastreador. No entanto, é possível fazer algumas considerações com base na análise dos resultados obtidos com a utilização da regressão linear múltipla.

A regressão linear resultou nos coeficientes de regressão  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ . Os coeficientes foram calculados utilizando a biblioteca *statsmodel* do *Python*. A tabela 7 mostra os coeficientes de regressão  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ .

Tabela 7 – Coeficientes de regressão.

Coeficiente	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
Valor	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-5}$	$-7 \times 10^{-4}$

Fonte: Autoria própria (2023).

O coeficiente de determinação  $R^2$  foi calculado utilizando a função *rsquared()* da biblioteca *statsmodel*. O coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 0,985. O erro padrão foi calculado utilizando a função *bse()* da biblioteca. A tabela 8 mostra o erro padrão de cada variável independente.

Tabela 8 – Erro padrão.

Variável	$I_c$	$T_a$	$T_{pf}$
Erro padrão	$3.72 \times 10^{-6}$	$1.56 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^{-5}$

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dos coeficientes de regressão e do erro padrão, foi possível calcular o intervalo de confiança de 95% para cada variável independente.

Com os valores dos coeficientes e o valor da coeficiente de determinação  $R^2$ , foi possível validar a regressão linear múltipla. Aplicando os dados obtidos no ensaio de configuração mono focal com o rastreador desligado, foi possível prevê os valores de  $I_c$ ,  $T_a$  e  $T_{pf}$ , que foram utilizados para calcular a eficiência do fogão solar. A tabela 9 mostra os valores previstos de  $I_c$ ,  $T_a$ ,  $T_{pf}$  e a eficiência do fogão solar.

A partir dos valores previstos, foi possível calcular a eficiência útil do fogão solar com rastreador. A tabela 10 mostra a diferença entre as eficiências do fogão solar com rastreador e sem rastreador para a temperatura de 120.7°C.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que a eficiência do fogão solar com rastreador seria maior do que a eficiência do equipamento sem rastreador. Isso ocorre porque o

Tabela 9 – Valores previstos.

Variável	$I_c$	$T_a$	$T_{pf}$	$\eta_u$
Valor	834	35,4	120,7	0,9427
Valor	834	35,4	148.3	0,9233
Valor	834	35,4	95	0,9608

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 10 – Comparação entre as eficiências.

Eficiência	Sem rastreador	Com rastreador	Diferença
Eficiência	72.3%	72.5%	0.2%

Fonte: Autoria própria (2023).

rastreador solar garante que o concentrador esteja sempre alinhado com a direção da luz solar, maximizando a concentração de energia solar no ponto focal do concentrador.

No entanto, é importante ressaltar que essa é apenas uma análise teórica. Para confirmar essa hipótese, seria necessário realizar testes com o rastreador solar em condições climáticas favoráveis para o mesmo.

## 5 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo a construção de um fogão solar parabólico, com o intuito de avaliar a eficiência do equipamento no cozimento de alimentos utilizando diferentes configurações de funcionamento. Para isso, foi realizado ensaios com o equipamento com as configurações bi e mono-focal, além dos métodos teóricos para prevê a eficiência utilizando o sistema de rastreamento. A configuração mono-focal se mostrou mais eficiente que a configuração bi-focal, devido a maior radiação solar incidente no ponto focal do equipamento. A configuração mono-focal apresentou uma eficiência de 72,3%, enquanto a configuração bi-focal apresentou uma eficiência de 43%.

Analisando os dados obtidos, foi possível observar que a eficiência do fogão solar com rastreador se mostrou 0,2% maior do que a do mesmo sem rastreador. Essa diferença de eficiência é pequena, porém, é perceptível que a do equipamento com rastreador é maior do que a sem rastreador. Na literatura, é possível encontrar trabalhos que mostram que o rastreador solar aumenta a eficiência de absorção energética em até 20% Majeed et al. (2021). No entanto, é importante ressaltar que esses trabalhos foram realizados em condições climáticas favoráveis para a realização dos testes, o que não ocorreu no presente trabalho.

Diante disso, é possível afirmar que o equipamento se mostrou eficiente para o uso proposto e que a utilização de tecnologias como o rastreador solar podem aumentar a eficiência do equipamento. Além disso, é importante ressaltar que o equipamento pode ser utilizado em regiões onde não há acesso a energia elétrica, como em comunidades rurais e ribeirinhas, proporcionando assim, uma melhor qualidade de vida para as pessoas que vivem nessas regiões.

## **6 Sugestões para trabalhos futuros**

1. A estrutura de sustentação do fogão solar parabólico pode ser melhorada, visando uma maior facilidade de transporte e manuseio do equipamento.
2. Utilizar espelhos para aumentar a área de captação de energia solar, aumentando assim, a eficiência do equipamento.
3. Utilizar o equipamento com uma caixa no ponto focal, visando o aproveitamento da energia solar para assar alimentos.
4. Projetar um armazenador térmico para o fogão solar parabólico, visando o uso do equipamento em horários que não há incidência de radiação solar.
5. Desenvolver sistema de segurança para o equipamento, visando evitar acidentes com o mesmo.

## Referências

- ACKHARI, O.; BENGHANEM, A.; OUAHIDI, A. A new sun-tracking approach for energy saving. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 169, p. 820–835, 2021.
- AGOSTINHO, C. W. **Orientação automática de módulos fotovoltaicos para o acompanhamento do movimento sazonal do sol utilizando controle inteligente**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.
- ALBERTO, C.; VARELLA, F. K. d. O. M. et al. Fogão solar do tipo painel com materiais de baixo custo: Uma alternativa para cocção de alimentos. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 2, n. 1, p. 22–30, 2020.
- Andrade Filho, A. E. d. **Fogão solar para cocção de alimentos**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.
- BAHIA, S. **Secti - Secretaria de Ciência, tecnologia E inovação - governo da bahia**. 2018. Disponível em: <[http://www.secti.ba.gov.br/arquivos/File/atlas\\_solar\\_2023/atlassolarBahia2018.pdf](http://www.secti.ba.gov.br/arquivos/File/atlas_solar_2023/atlassolarBahia2018.pdf)>.
- Bessa Neto, L. J. de; JR, F. J. S.; GUERRA, F. K. d. O. V.; CARVALHO, A. E. d. O.; SILVA, E. P. F. D. Análise comparativa entre um fogão solar do tipo parabólico e fogão solar do tipo caixa. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 1, n. 1, p. 205–212, 2019.
- BONIFÁCIO, D. R.; FONGARO, M. H. O.; MATOS, A. C. T. de; SILVA, E. dos S.; CORDEIRO, M. L. de P.; SILVA, T. de O.; LUZ, T. M. Energia mais sustentável: Aspectos construtivos para o aproveitamento energético e economia de eletricidade. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 14, n. 4, 2022.
- BRANDÃO, G. **Como Funciona o Sistema de Energia Solar Fotovoltaica**. Minha Casa Solar, 2018. Disponível em: <<http://blog.minhacasasolar.com.br/como-funciona-energia-solar-fotovoltaica/>>.
- CAVALCANTE, R. L. d. P. **Estudo de um coletor solar para aquecimento de água com grade absorvedora em duas configurações: com e sem aletas**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.
- CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Tranferência de Calor e Massa**. [S.l.]: AMGH editora, 2009.
- CERQUEIRA, A. H.; GOMES, R. L. Análise histórica da irradiação global no município de ilhéus/ba. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 10, n. 1, p. 01–10, 2019.
- CHIANCA, M. d. S. **Estudo de um forno solar fabricado com gabinetes de computador em desuso**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.
- CIAMPONI, C. E. S. Geração de energia elétrica domiciliar solar e eólica: análise das condições socioeconômicas para implantação em residências de baixo consumo. 2015.
- DIENSTMANN, G. Energia solar: uma comparação de tecnologias. 2009.

ESCOLA, B. **O que É convecção?** 2023. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-conveccao.htm>>.

FAZ, A. Q. **Como Fazer Um Forno Solar - DIY.** 2022. Disponível em: <<https://www.assimquefaz.com/como-fazer-um-forno-solar-diy/>>.

FERNANDES, R. S. **Estudo de um fogão solar a concentração para duas configurações mono e bifocal.** Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

FERREIRA, R. R.; FILHO, P. C. da S. Energia solar fv-geração de energia limpa. In: **V Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação.** [S.l.: s.n.], 2010.

FONSECA, A. L. A. d. Escalonamento inteligente do consumo de energia elétrica em função de diferentes imposições de conforto térmico e aproveitamento de energia solar. Universidade Federal de São Carlos, 2022.

FRANÇA, D. F. **Estudo comparativo da influência de um heliostato em um forno solar tipo caixa.** Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

GATE, R. 2023. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Esquema-mostrando-os-efeitos-da-radiacao-incidente\\_fig16\\_43655142](https://www.researchgate.net/figure/Esquema-mostrando-os-efeitos-da-radiacao-incidente_fig16_43655142)>.

GONÇALVES, J. V. N. Forno solar de baixo custo: construção e estudo da viabilidade térmica. 2022.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física 4: Óptica e física moderna. **Tradução de Denise Helena da Silva Sotero, Gerson Bazo Costamilan, Luciano Videira Monteiro e Ronaldo Sérgio de Biasi,** v. 8, 2012.

IBRAHIMI, M. E.; ELMOUATAMID, A.; BAKHOUYA, M.; FEDDI, K.; OULADSINE, R. Performance evaluation of fixed and sun tracking photovoltaic systems. **Proceedings of the IEEE,** p. 1–6, 05 2019.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. **Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa .** [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

KRAUSE, M. O.; PIMENTA, M. A. Um estudo sobre a incidência solar e o posicionamento geográfico da cidade de Ilhéus, Bahia, como fator relevante para a instalação de sistemas fotovoltaicos a study on the solar incidence and the geographic positioning of the city of Ilhéus, Bahia, as a relevant factor for the installation of. **Brazilian Journal of Development,** v. 7, n. 8, p. 82779–82795, 2021.

MAFRA, R. I. d. S. **Estudo de viabilidade de um fogão solar fabricado com três antenas parabólicas em desuso.** Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

MAJEED, M. H.; ALWAN, N. T.; SHCHEKLEIN, S.; MATVEEV, A. Electromechanical solar tracker system for a parabolic dish with cpu water heater. **Materials Today: Proceedings,** Elsevier, v. 42, p. 2346–2352, 2021.

MATOS, C. **Transmissão de Calor: Condução, convecção E irradiação.** Cola da Web, 2022. Disponível em: <<https://www.coladaweb.com/fisica/termologia/transmissao-de-calor>>.

MOREIRA, D. R.; WEBLER, L. C.; MACAGNAN, M. H. Análise óptica da curvatura de espelhos de um concentrador fresnel linear. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 9, n. 1, p. 20–29, 2018.

MUNDOMAX. [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.mundomax.com.br/antena-de-chapa-1-35m-lemon#>>.

Pereira Neto, R. V. **Viabilidade térmica e econômica de um forno solar tipo caixa fabricado a partir de elementos recicláveis em desuso**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

PINHO, J. T. et al. **Energia eólica: teoria e aplicações**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2014. v. 1. 47–499 p.

PINTO, M. et al. **Fundamentos de energia eólica**. [S.l.]: Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

SERWAY, R.; JR, J. J. Princípios de física-volume 4: Óptica e física moderna. **Cengage Learning**, 2005.

SILVA, A. M. d. Modelo computacional para controle de sistemas de rastreamento solar de eixo duplo com utilização de técnicas de aprendizado profundo. Centro Universitário SENAI CIMATEC, 2023.

SILVA, V. L. O. et al. Desenvolvimento de projetos de sistemas fotovoltaicos com auxílio do software matlab. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019.

TELHANORTE, B. T. **Como Escolher Aquecedor Solar: 5 Pontos Importantes**. 2023. Disponível em: <<https://shop14920.etjrdc.org/content?c=coletor%2Bsolar%2Bpre%2B3%27o&id=13>>.

THARAMUTTAM, J. K.; NG, A. K. Design and development of an automatic solar tracker. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 143, p. 629–634, 2017.

UPADHYAY, B. H.; PATEL, A. J.; SADASIVUNI, K. K.; MISTRY, J.; RAMANA, P.; PANCHAL, H.; PONNAMMA, D.; ESSA, F. Design, development and techno economic analysis of novel parabolic trough collector for low-temperature water heating applications. **Case Studies in Thermal Engineering**, Elsevier, v. 26, p. 100978, 2021.

WEB, E. C. d. **Radiação Solar: O que É, Tipos e Como Chega à Terra**. Cola da Web, 2019. Disponível em: <<https://www.coladaweb.com/fisica/ondas/radiacao-solar>>.