



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DE UM
HELIOSTATO EM UM FORNO SOLAR TIPO CAIXA

DANIEL FERREIRA FRANÇA
NATAL- RN, 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DE UM HELIOSTATO EM UM FORNO SOLAR

DANIEL FERREIRA FRANÇA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, orientado pelo Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza.

NATAL - RN

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DE
UM HELIOSTATO EM UM FORNO SOLAR TIPO
CAIXA

DANIEL FERREIRA FRANÇA

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza _____
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Eng. Raimundo Vicente Pereira Neto _____
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo

Eng. Jaciel Cardoso de Lima _____
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Externo

NATAL, 30 de abril de 2021.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, Ana Cristina, a quem eu amo incondicionalmente.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a toda minha família, em especial a minha mãe, pai, avós, padrasto, irmãos e a minha namorada, Ana Paula, que foi quem mais me apoiou nessa reta final da conclusão do curso, dividindo as dores e felicidades dessa caminhada e também por todos os momentos que compõe os capítulos da nossa história. Obrigado pela contribuição de cada um de vocês.

Ao meu orientador, Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza, por todo conhecimento, atenção e empatia durante o desenvolvimento e busca de soluções para a construção deste trabalho.

A Raimundo Neto, por sua disponibilidade e conhecimento que tornou possível a realização dos experimentos no laboratório em meio a pandemia.

Aos amigos que tive durante a graduação, em especial a Átila, Djalma, João Paulo, Pedro e Nicolás, vocês tornaram a rotina universitária possível.

Aos amigos do suporte da SINFO, Dedé, Iury, Pedro, Jamjo, Amara, Claryssa, Rafa, Tavinho, Aldhen, Tiago, Igor, Géssica, Janiely, Valéria, Samantha, Bira, Rodrigo, Jordy, Guaca, Matheus, André Luiz e Clarissa que foram minha segunda família, compartilhando sempre bons momentos.

FRANÇA, D. F. **Estudo Comparativo da Influência de um Heliostato em um Forno Solar Tipo Caixa**. 2021. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2021.

Resumo

Devido à crescente busca por tecnologias cada vez mais sustentáveis é notável o apelo crescente por energias renováveis no atual cenário mundial. Desse modo, algumas fontes de energia têm ganhado, gradativamente, mais espaço, investimento e pesquisa tal como a energia solar. Cientes da grande desigualdade social no Brasil, da grande quantidade de pessoas que se enquadram na condição de extrema pobreza, bem como, da dificuldade que essas pessoas possuem para a cocção de seus alimentos, é perceptível a busca cada vez maior pelo desenvolvimento de instrumentos que utilizem energia solar como forma de auxiliar nesse tipo de situação. Esse trabalho se propôs a realizar um estudo comparativo da influência de um heliostato em um forno solar tipo caixa, verificando, através da eficiência de cocção, a ação, os efeitos e os benefícios que a presença de um heliostato causam no processo como um todo. Dessa forma, foi possível verificar que com o heliostato o forno solar teve um ganho de 9,4% no rendimento térmico, uma influência considerável, enquanto sem esse equipamento o forno apenas atinge temperaturas suficientes para aquecer o alimento, sem proporcionar seu assamento.

Palavras-chave: forno solar, energia solar, heliostato.

FRANÇA, D. F. **Comparative Study of a Heliostat's Influence in a Box Solar Cooker.** 2021. 55 p. Conclusion work project (Graduate in Mechanical Engineering) - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2021.

Abstract

Due the development search for sustainable technologies, the growing appeal for renewable energies in the current world scenario is notable. In this way, some energy sources have gradually gained more space, investment, and research such as solar energy. Aware of the great social inequality in Brazil, the large number of people in condition of extreme poverty, as well as the difficulty that these people have in cooking their food, it is noticeable the increasing search for the development of instruments that use solar energy as a way to help in this type of situation. This work proposed a comparative study of a heliostat's Influence in a Box Solar Cooker, verifying, through cooking efficiency, effects, and benefits, what a heliostat's presence causes in the process as a whole. Thus, it was possible to verify that with the heliostat, the solar cooker had a gain of 9.4% in the thermal yield, a considerable influence, while without its presence the oven only reaches sufficient temperatures to heat the food, without providing its baking.

Keywords: solar cooker, solar energy, heliostat.

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil, medido em kWh/kWp.ano

Figura 2 – Mapas da irradiação solar global média mensal para o território brasileiro obtido com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000

Figura 3 – Esquema do efeito estufa em um forno solar

Figura 4 – Estufa de cozimento Multi Fan - Plug

Figura 5 – Exemplificação da condução térmica por condução

Figura 6 – Forno com blocos compostos por fibra de cerâmica para reduzir a perda de calor por condução térmica

Figura 7 – Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção

Figura 8 – Esquema mostrando os efeitos da radiação incidente

Figura 9 – Representação esquemática (a) da reflexão especular, na qual os raios refletidos estão todos paralelos uns em relação aos outros e (b) reflexão difusa, na qual os raios refletidos se propagam em direções aleatórias

Figura 10 – Raio incidente atingindo uma superfície de um dirente meio, onde o seu raio refratado tem um ângulo diferente do ângulo de incidência

Figura 11 – Esquema de um forno solar tipo caixa com uma superfície refletora

Figura 12 – Forno solar semiacabado com uma cobertura de gesso

Figura 13 – Forno solar sem o componente refletor

Figura 14 – Desenho esquemático do forno solar com suas principais dimensões em milímetros

Figura 15 – Termômetro OMEGA RDXL4SD associado aos termopares

Figura 16 – Termômetro infravermelho

Figura 17 – Radiômetro Instrutherm MES-100

Figura 18 – Forno solar com carga para início do teste

Figura 19 – Forno solar com carga para início do teste com heliostato

Figura 20 – Pizza após 45 minutos assando no forno com heliostato

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Temperaturas do forno e irradiação global, teste sem carga e sem heliostato

Tabela 2 – Temperaturas do forno e irradiação global, teste com carga e sem heliostato

Tabela 3 – Temperaturas do forno e irradiação global e irradiação direta, teste com carga e com heliostato

Tabela 4 – Valores de constantes

Tabela 5 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno sem carga e sem heliostato

Tabela 6 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno com carga e sem heliostato

Tabela 7 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno com carga e com heliostato

Tabela 8 – Fluxos de energia e rendimentos do sistema sem e com heliostato

Tabela 9 – Porcentagem do fluxo de energia perdido em cada uma das superfícies do sistema sem e com equipamento

Tabela 10 – Temperaturas da placa e do ar do sistema sem e com heliostato

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno sem carga e sem heliostato

Gráfico 2 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno sem carga e sem heliostato

Gráfico 3 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e sem heliostato

Gráfico 4 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e sem heliostato

Gráfico 5 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e com heliostato

Gráfico 6 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e com heliostato

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Gráficos.....	viii
Sumário	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	5
1.1.1 Objetivos gerais.....	5
1.1.2 Objetivos específicos.....	5
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Energia Solar	6
2.1.1 Energia Solar Heliostática	7
2.2 Efeito Estufa.....	7
2.3 Transferência de energia no cozimento	8
2.3.1 Condução	8
2.3.2 Convecção.....	10
2.3.3 Radiação	11
2.4 Conceitos ópticos: reflexão e refração	12
2.5 Fornos solares	13
2.5.1 Forno solar tipo caixa	13
3 Metodologia	15
3.1 Características do objeto de estudo.....	15
3.2 Procedimento experimental.....	18

3.3 Conservação da energia no forno solar	18
3.3.1 Fluxo de energia de entrada no forno.....	18
3.3.2 Fluxo de energia perdido para o ambiente	19
3.3.3 Rendimento térmico	21
4 Resultados e Discussões	22
4.1 Teste sem carga e sem heliostato	22
4.2 Teste com carga e sem heliostato	24
4.3 Teste com carga e com heliostato	26
4.4 Cálculo do balanço energético do forno solar	28
4.4.1 Balanço energético – Forno sem carga e sem heliostato.....	29
4.4.2 Balanço energético – Forno com carga e sem heliostato.....	31
4.4.3 Balanço energético – Forno com carga e com heliostato.....	32
4.5 Análise dos resultados	33
5 Conclusões.....	36
6 Referências	37

1 Introdução

Devido à crescente busca por tecnologias cada vez mais sustentáveis é notável o apelo cada vez maior de energias renováveis no atual cenário mundial. Segundo a WWF-Brasil (2021), o conceito mais aceito de desenvolvimento sustentável surgiu na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pela Organização das Nações Unidas (ONU), sugerindo um desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual sem, contudo, comprometer as necessidades das futuras gerações. Em outras palavras, seria necessário que o desenvolvimento econômico passasse a considerar as necessidades do meio ambiente, bem como suas limitações.

Desse modo, algumas fontes de energia têm ganhado, gradativamente, mais espaço e maior investimento. No Brasil, segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), as fontes renováveis de energia alcançaram uma demanda de 46,1% de participação na matriz energética, em 2019. Essas fontes de energia renováveis incluem a hidráulica, a eólica, a bioenergia e a solar.

Nesse mesmo ano, a energia solar teve um crescimento de 92% no país, seguindo uma tendência mundial, apesar de ainda não superar fontes de energias não renováveis tais como o carvão.

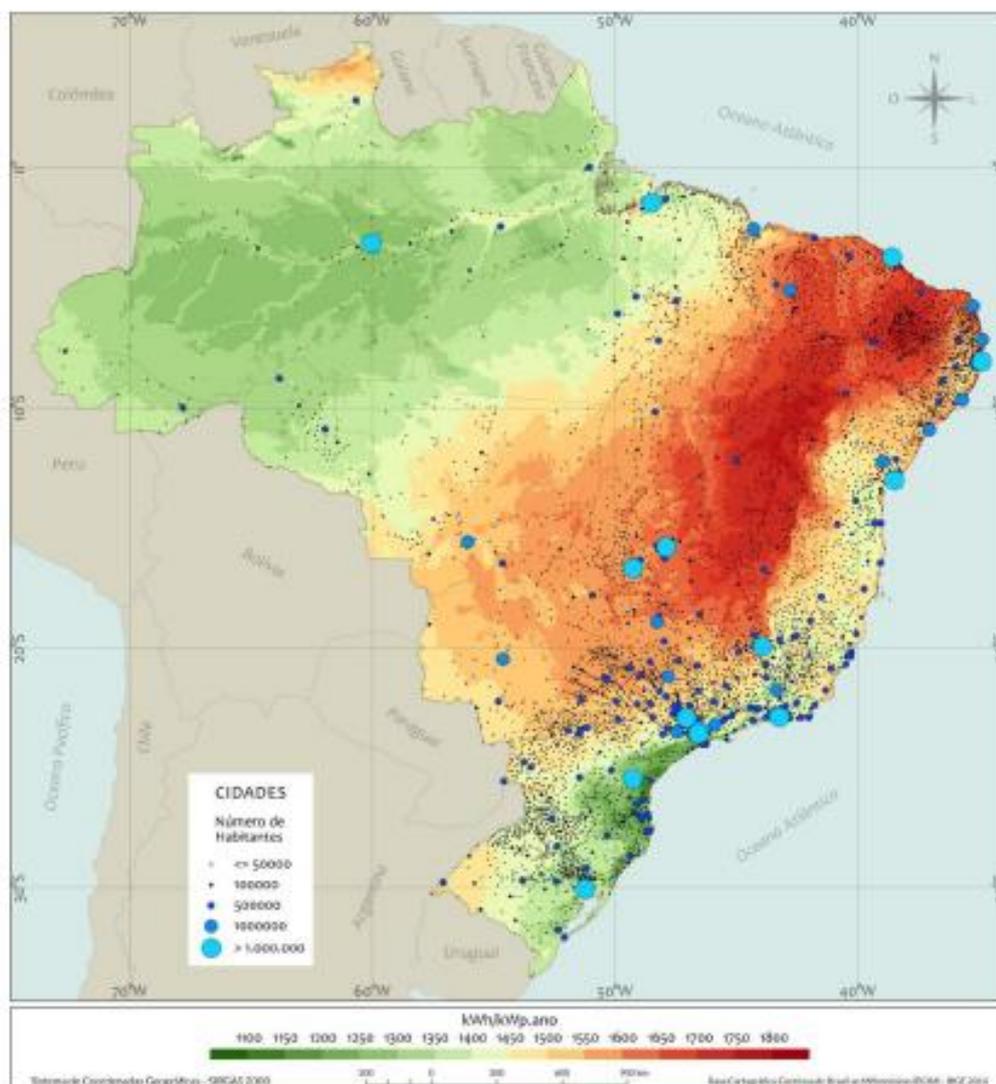
A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, a energia proveniente do Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra [...]. A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência atual da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W (PEREIRA et al., 2017).

São diversos os processos e tecnologias produzidos através do uso de energia solar, com particular avanço no atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, que possibilitam a conversão em eletricidade.

De todo modo, é necessário que haja uma avaliação prévia da capacidade de utilização desse tipo de energia, uma vez que, algumas variáveis devem ser consideradas para verificar o potencial de recursos de energia solar numa região. Para Pereira et al. (2017), a avaliação desses recursos envolve basicamente três componentes, tais como: a distribuição espacial, sua variabilidade temporal e, por fim, as incertezas associadas às duas primeiras.

A geração de energia elétrica fotovoltaica, de modo geral, tem grande capacidade no país e sendo o Brasil um país com proporções continentais é possível presumir que existam enormes diferenças e peculiaridades no potencial de energia solar ao longo de todo território, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Mapa do potencial de geração solar fotovoltaica em termos do rendimento energético anual para todo o Brasil, medido em kWh/kWp.ano



Fonte: Pereira et al. (2017)

Há, entretanto, diversos fatores que ainda impedem a disseminação e a ampliação do uso da energia solar no Brasil. Um deles e talvez o mais considerável seja o alto custo inicial de aquisição de placas fotovoltaicas para a geração desse tipo de energia.

Segundo Lima e Camurça (2017), o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, apesar disso o setor elétrico brasileiro ainda é

bastante dependente da energia hidráulica, possuindo fontes alternativas, como a eólica e solar, que ainda não são plenamente exploradas e encontram uma série de dificuldades para se desenvolverem. Ainda segundo as autoras, os principais entraves para o aproveitamento dessas energias no país estão relacionados, não somente aos altos custos decorrentes da sua utilização, envolvendo, por exemplo, a tecnologia empregada protegida por patentes, mas também à falta de políticas públicas eficientes que as consolidem.

Países que possuem menor incidência de raios solares, como é o caso da Alemanha, conseguem ainda assim obter um aproveitamento superior ao nosso quando comparado, devido à adoção de medidas que propõem, por exemplo, incentivos fiscais.

Desse modo, é possível ver que o apoio estatal é fundamental para que o avanço de tecnologias sustentáveis se desenvolvam no país e consigam diminuir do nosso cotidiano o consumo de fontes não renováveis tais como o carvão, o petróleo, a lenha e o gás liquefeito de petróleo (GLP).

Em 2019, segundo o IBGE (2019), cerca de $5,12 \times 10^7$ m³ de lenha e $1,31 \times 10^8$ m³ de madeira em tora são produzidas no Brasil, considerando a produção da silvicultura no país. O nordeste, por sua vez, produz 1,14% da lenha e 10,27% da madeira em tora brasileira, em que 1,8% da lenha produzida no nordeste advém do estado do Rio Grande do Norte. Considerando, ainda, o Rio Grande do Norte, 100% da produção de silvicultura do estado provém da lenha.

Esse tipo de fonte de energia é considerada poluente já que além de não ser renovável traz prejuízos ao meio ambiente de diversas formas e mesmo assim continuam possuindo um consumo considerável, inclusive para a cocção de alimentos.

Analisando a situação do ponto de vista social, cientes da absurda desigualdade existente no Brasil, é possível entender a tendência de continuidade desses números.

Segundo Nery (2019), “em 2018, o país tinha 13,5 milhões de pessoas com renda mensal inferior a R\$ 145, ou U\$S 1,9 por dia, critério adotado pelo Banco Mundial para identificar a condição de extrema pobreza”. Considerando que desde 2018 até 2021 o valor do dólar subiu consideravelmente, verificamos o agravamento da situação de poder de consumo dessas pessoas, levando em conta que o preço

do botijão de GLP sofreu vários reajustes ao longo desse período, o que propicia e incentiva a utilização de lenha, por exemplo, para a cocção de alimentos.

Segundo a Agência Nacional de Petróleo - ANP - (2020), o preço final ao consumidor de um GLP (R\$/botijão de 13 kg) em outubro de 2020, tendo em vista a variação de preço nos estados brasileiros, chegou à máxima de R\$93,68, o que corresponde a aproximadamente 9% do salário mínimo desse período, que era de R\$1.045,00.

A iniciativa de impulsionar o desenvolvimento de instrumentos que utilizem energia solar é então uma forma de auxiliar nesse tipo de situação e difundir o uso de recursos naturais de forma sustentável.

Instituições como a Solar Cookers International (SCI), por exemplo, têm buscado a ampliação e disseminação de métodos e pesquisas resultando em uma maior adoção do cozimento de alimentos através da utilização da energia solar numa amplitude global.

Segundo o site do SCI (2018) “3 em 7 pessoas carecem de combustível sustentável para cozinhar refeições e tornar a água segura para beber. [...] Quase 3 bilhões de pessoas cozinham em lenha, dejetos animais ou fogueiras a carvão”. Dessa forma, o cozimento através da energia solar ajudaria a solucionar diversos problemas existentes atualmente, não apenas do ponto de vista ambiental, mas também do social.

Um forno solar consiste em uma estrutura semelhante ao forno convencional, divergindo apenas o combustível, que é a energia solar. Desse modo, para que a obtenção do combustível ocorra de modo satisfatório, é preciso que o forno possua uma radiação incidente e materiais que proporcionem um bom isolamento térmico. Comumente, são utilizados espelhos para otimizar a radiação incidente e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do forno; a essa estrutura é dado o nome de heliostato.

Em um sistema de captação, sem a utilização de espelhos ou outros processos de baixa concentração da energia solar, quando a nebulosidade é alta, o valor nominal de aproveitamento de energia de uma determinada placa fotovoltaica não será atingido. Dessa maneira, ocorreria o desperdício da capacidade instalada. Ao se acrescentarem superfícies refletoras ou espelhos que reflitam a energia solar sobre essa placa fotovoltaica, estar-se-á aumentando a incidência de raios solares sobre ela, propiciando, dessa maneira, um aumento da capacidade de geração,

otimizando assim a absorção de energia [...] (DUTRA, RODRIGUES E SEDOR, 2019).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Esse trabalho se propõe a realizar um estudo comparativo da influência de um heliostato em um forno solar tipo caixa, verificando, através da eficiência de cocção, a ação, bem como, os efeitos e os benefícios que a presença desse elemento causam no processo como um todo.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Ensaiai o forno solar realizando o assamento, sem a presença do heliostato;
- b) Ensaiai o forno solar realizando o assamento, com a utilização do heliostato;
- c) Propor cálculos do balanço de energia para calcular a eficiência do forno em ambos os casos;
- d) Comparar os resultados para a obtenção de um resultado sobre a influência dada pelo heliostato na utilização do forno solar estudado.

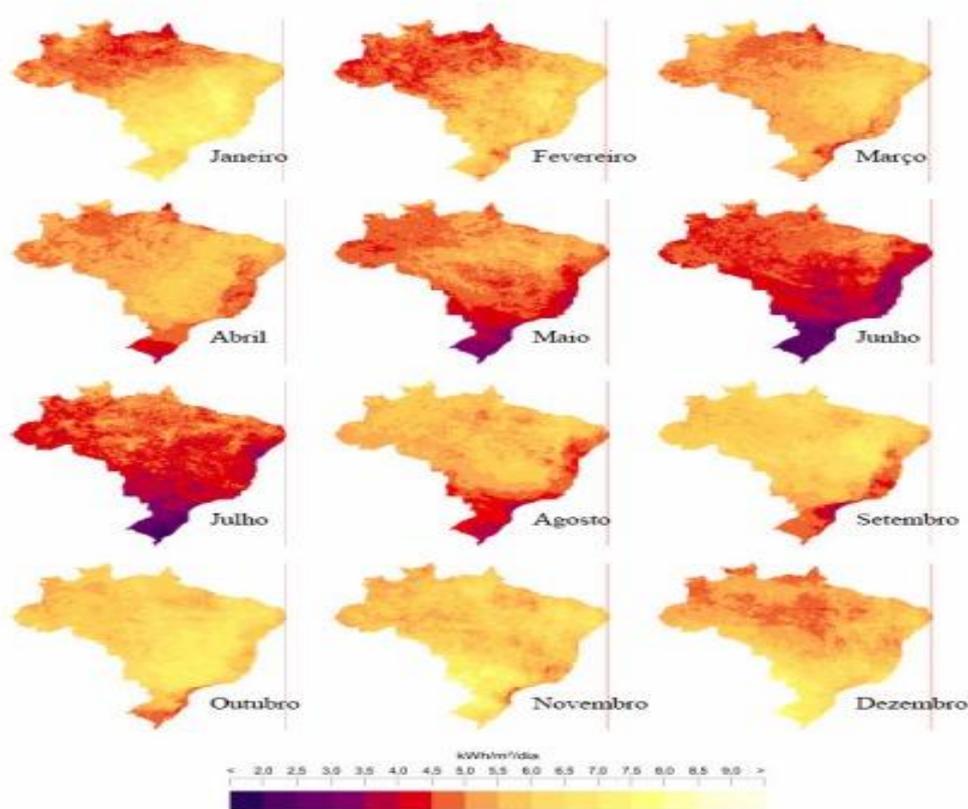
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Energia Solar

De acordo com Pereira et. al. (2017), diferentemente das fontes convencionais de energia utilizadas, a energia solar é temporariamente intermitente e apresenta uma variabilidade espacial em relação a condições meteorológicas e fatores astronômicos.

Como mostrado na figura 2, é possível verificar a diferença na radiação solar no território brasileiro, entre cada um dos meses, pois a energia solar tem também uma forte relação com a posição orbital.

Figura 2 – Mapas de irradiação solar global média mensal para o território brasileiro obtido com o uso do modelo BRASIL-SR a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000



Fonte: Moura (2007)

A energia solar é uma fonte de energia renovável e limpa que vem crescendo, mas ainda não é uma das maiores fontes de energia aproveitadas no Brasil.

Segundo Collet (2020), a fonte solar fotovoltaica atingiu ao fim do primeiro trimestre de 2020 um aumento de 14,4% de capacidade instalada no Brasil. Considerando apenas usinas de energia com grande porte, a fonte solar representa 1,5% da matriz elétrica brasileira, mas mesmo com o crescimento, ainda está atrás de fontes não renováveis, como o carvão que possui 2,0%.

2.1.1 Energia Solar Heliostática

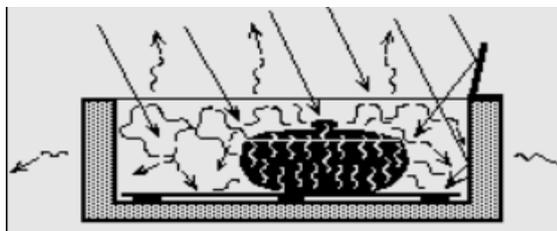
A tecnologia heliotérmica é uma tecnologia que aproveita o calor da radiação solar para geração de energia elétrica ou para algum processo que necessita direto do calor, como na metalurgia (TIGRE, 2020). Essa tecnologia é também utilizada em fornos solares através de heliostatos. Os heliostatos direcionam os raios solares, através da irradiação normal direta, para um receptor, com o objetivo de aquecer algum fluido ou aumentar a temperatura de algum sistema.

O principal componente heliotérmico é o coletor solar (Kalogirou, 2014), no caso deste trabalho será o heliostato responsável por coletar e direcionar a energia solar para o forno em estudo.

2.2 Efeito Estufa

O efeito estufa é o aumento da temperatura do interior de um sistema, onde a superfície, como o vidro, permite que a radiação solar entre, mas não permite que a radiação infravermelha a partir das superfícies internas saia (ÇENGEL E GHAJAR, 2011).

Figura 3 - Esquema do efeito estufa em um forno solar



Fonte: Solar Cookers International (2021)

Segundo SILVA (2004), a indústria atualmente dispõe de diversos equipamentos para realizar o cozimento de alimentos, um deles é a estufa. Através de um sistema de estufa é possível fazer com que o vapor de água cozinhe os alimentos. Em projetos mais complexos, as estufas são utilizadas para produção de

alimentos em grande escala e já existem, por exemplo, estufas para cozimento, defumação e desidratação de alimentos.

Figura 4 - Estufa de cozimento Multi Fan - Plug



Fonte: Arprotec (2021)

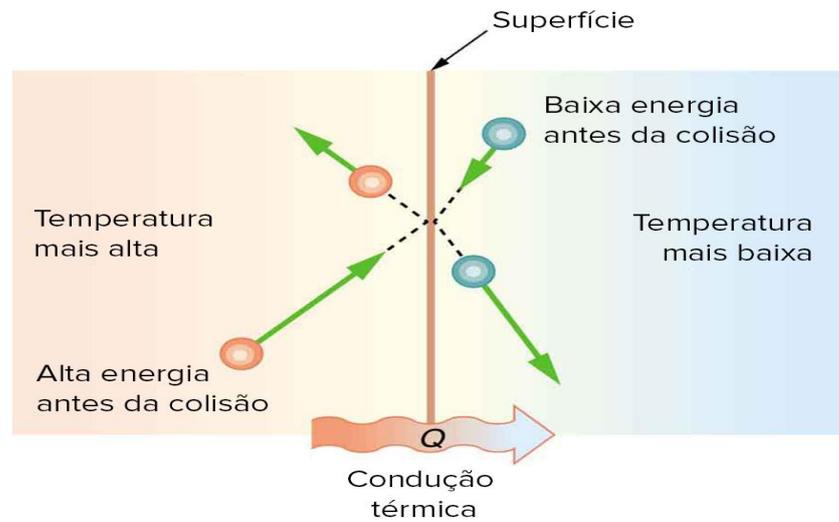
2.3 Transferência de energia no cozimento

O calor, que é a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como resultado da diferença de temperatura, ocorre de três maneiras diferentes: condução, convecção e radiação. Todas essas três maneiras necessitam de uma diferença de temperatura e sempre o fluxo de transferência será do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura (ÇENGEL E GHAJAR, 2011).

2.3.1 Condução

A condução é a transferência de energia através das partículas com maior vibração para as partículas vizinhas com menos energia. Essa forma de calor pode ocorrer tanto em sólidos, líquidos ou gases, sendo que em líquidos e gases a condução deve-se às colisões e à difusão das moléculas em seus movimentos aleatórios (ÇENGEL E GHAJAR, 2011).

Figura 5 - Exemplificação da condução térmica por condução



Fonte: Khan Academy (2017)

No processo de cocção, é possível identificar a condução quando a energia é transferida do recipiente (como panelas e formas) para o alimento (SILVA, 2019).

2.3.1.1 Isolamento térmico

Como a condução é desejável na transferência do recipiente para o alimento, o mesmo processo não é ansiado entre o interior do forno solar com as paredes do sistema, pois é preferível que a energia fique contida dentro do forno, então, são utilizados materiais como isopor, madeira e borracha para reduzir a taxa de transferência de energia, já que esses possuem baixa condutividade térmica, aumentando assim a eficiência do forno solar.

Figura 6 - Forno com blocos compostos por fibra de cerâmica para reduzir a perda de calor por condução térmica

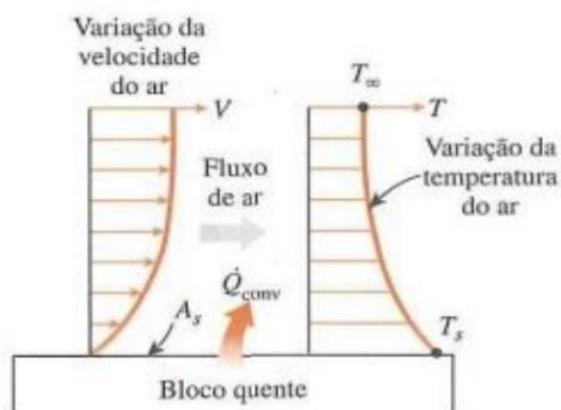


Fonte: Termocom Engenharia (2021)

2.3.2 Convecção

A convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido (ÇENGEL E GHAJAR, 2011).

Figura 7 - Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção



Fonte: Çengel e Ghajar (2011)

Segundo Çengel e Ghajar (2011) a convecção pode ser forçada ou natural (livre). A convecção forçada ocorre quando o fluido é forçado a fluir na superfície por meios externos (utilizando bombas e ventiladores). Já a convecção livre é quando

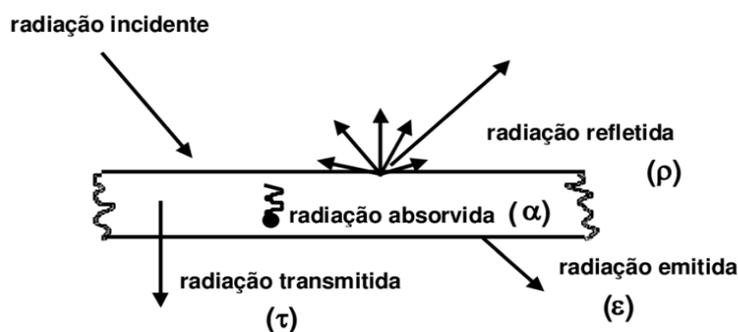
ocorre quando o fluido tem seu movimento por diferenças de densidades decorrentes da variação da temperatura do fluido.

2.3.3 Radiação

Enquanto a convecção e condução necessitam de um meio material para a transferência de energia, a radiação não necessita, sendo essa mais eficaz quando está no vácuo (INCROPERA *et al.*, 2014). Segundo Incropera et al. (2014), a radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula, já essa energia liberada dependerá do poder emissivo de cada superfície, o poder emissivo máximo de um corpo é limitado pela lei de Stefan-Boltzmann.

É importante identificar a irradiação, que é a radiação incidente sobre uma superfície, de um material a outro, pois a radiação incidente em uma superfície terá parcelas de energias divididas entre transmissividade, absorvidade e refletividade.

Figura 8 - Esquema mostrando os efeitos da radiação incidente



Fonte: Prado e Kuga (2001)

Em um forno solar do tipo caixa, por exemplo, é interessante que a superfície incidente que receberá a radiação incidente do Sol tenha uma maior capacidade reflexiva, por isso são utilizados espelhos como heliostatos. Já a tampa do forno, deve ser de um material que tenha uma boa transmissividade, para que possa permitir a maior parte de radiação transmitida possível e assim aumentar a eficiência do forno.

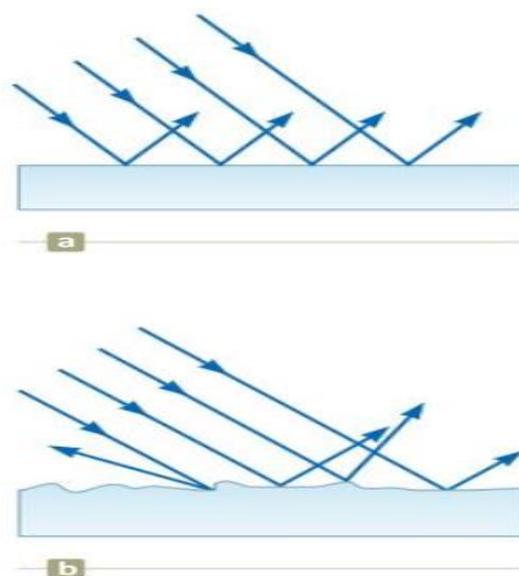
2.4 Conceitos ópticos: reflexão e refração

Para a cocção dos alimentos e melhoramento da eficiência térmica de um forno solar, é preciso direcionar os raios solares para o aparelho de forma que se tenha a maior irradiação possível para alcançar, assim, maiores temperaturas.

Primeiramente, as ondas eletromagnéticas estarão sujeitas a reflexão. Segundo Jewett e Searway (2012), quando um raio que percorre um meio encontra um limite com outro meio, 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 (JEWETT; SEARWAY, 2012).

Quando a reflexão ocorre em uma superfície irregular, os raios são refletidos em diferentes direções e essa reflexão é chamada de reflexão difusa. É interessante utilizar de uma reflexão mais próxima da especular para que se tenha o controle da incidência dos raios na superfície do forno solar.

Figura 9 - Representação esquemática (a) da reflexão especular, na qual os raios refletidos estão todos paralelos uns em relação aos outros e (b) reflexão difusa, na qual os raios refletidos se propagam em direções aleatórias

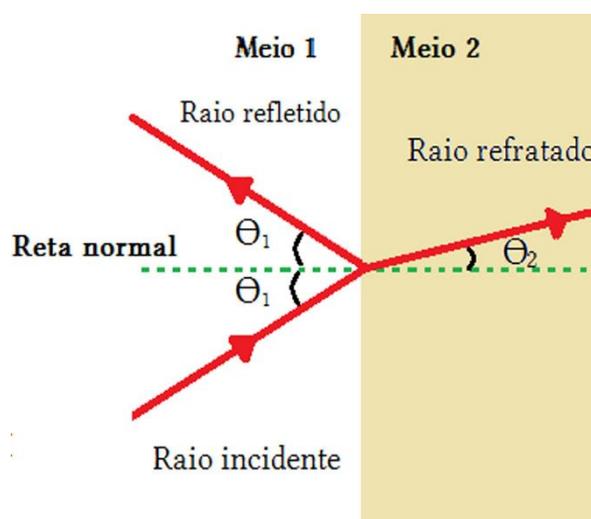


Fonte: Jewett e Searway (2012)

Assim como a reflexão é associada à refletividade da radiação incidente, o conceito físico da transmissividade, está associado à refração. Quando um raio de luz que é transmitido de um meio transparente para um outro diferente, o raio, ao

chegar no segundo meio muda sua direção no limite entre as diferentes superfícies, é considerado refratado (JEWETT E SEARWAY, 2012).

Figura 10 - Raio incidente atingindo uma superfície de um diferente meio, onde o seu raio refratado tem um ângulo diferente do ângulo de incidência



Fonte: Gonçalves e Rodrigues (2020)

A refração estará relacionada com o efeito estufa e também com o direcionamento na região interna do forno, para tentar direcionar a irradiação para a região interna com melhor aproveitamento, pois as ondas eletromagnéticas vão passar por três diferentes meios (ar ambiente, vidro e o ar do sistema).

2.5 Fornos solares

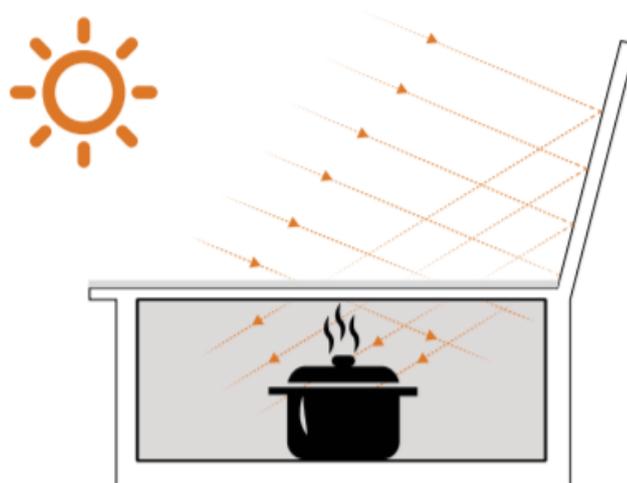
Os fornos solares são equipamentos que utilizam da energia solar para a cocção de alimentos. Existem diferentes tipos de fornos e variadas formas de realizar a sua confecção. No Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar (LMHES) da UFRN já foram construídos diversos fornos, fogões e secadores solares, demonstrando a viabilidade desses equipamentos, utilizando materiais de baixo custo e obtendo resultados favoráveis para cocção e secagem de alimentos.

2.5.1 Forno solar tipo caixa

O forno solar tipo caixa tem o princípio de funcionamento com uma tampa de vidro, para permitir a entrada da energia solar e não permitir que a radiação infravermelha saia, realizando o efeito estufa; uma superfície refletora, como um espelho para aumentar o fluxo da radiação incidente no forno; e uma caixa, de

preferência com material com baixa condutividade térmica, para reter a energia incidente dentro do forno.

Figura 11 – Esquema de um forno solar tipo caixa com uma superfície refletora



Fonte: Caatinga (2019)

Segundo Caatinga (2019), fatores que influenciam no rendimento do forno solar são: época do ano e horário, quantidade da irradiação, força do vento, espessura da panela, quantidade e tamanho das porções de alimentos e a quantidade de água.

3 Metodologia

O objeto de estudo foi o forno solar tipo caixa confeccionado por Silva (2020), realizando o teste de assamento do alimento sem o uso do heliostato, coletando propriedades térmicas para realizar balanços de energias do forno com carga e sem carga, avaliando a eficiência térmica que o heliostato proporciona.

3.1 Características do objeto de estudo

Segundo Silva (2020), para a construção do forno solar, a caixa estrutural utilizada foi um compósito com as proporções de 1 parte de cimento, 1,5 de isopor e 1 de gesso. Para a montagem dos moldes, utilizou-se pedaços de MDF reutilizados posteriormente com os moldes, para sua união foi acrescentada, como elemento ligante, uma mistura de cimento, areia e gesso.

Figura 12 – Forno solar semiacabado com uma cobertura de gesso



Fonte: Silva (2020)

Após esse procedimento o forno foi pintado com um fundo preto e colocado o suporte para a tampa de vidro, assim como o suporte para o heliostato. No caso deste trabalho, a configuração inicialmente utilizada será sem o suporte do heliostato.

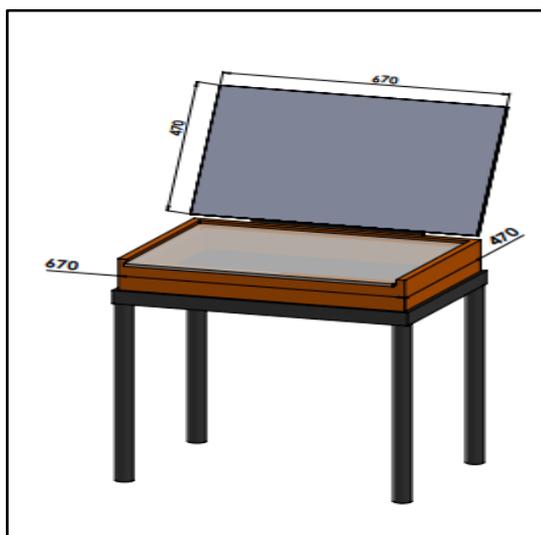
Figura 13 – Forno solar sem o componente refletor



Fonte: Elaborada pelo autor

As principais dimensões em milímetros do forno são ilustradas por Silva (2020) na Figura 14.

Figura 14 – Desenho esquemático do forno solar com suas principais dimensões em milímetros



Fonte: Silva (2020)

Para a medição de temperaturas ao longo do experimento, foram utilizados dois termopares, fixados à superfície de fundo preto e ao ar contido no forno, conectados ao termômetro OMEGA RDXL4SD, apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Termômetro OMEGA RDXL4SD associado aos termopares



Fonte: Elaborado pelo autor

Na medição das temperaturas das laterais, fundo do forno e tampa de vidro foi utilizado um termômetro infravermelho HM-88C HIGHMED, que pode ser visto na Figura 16.

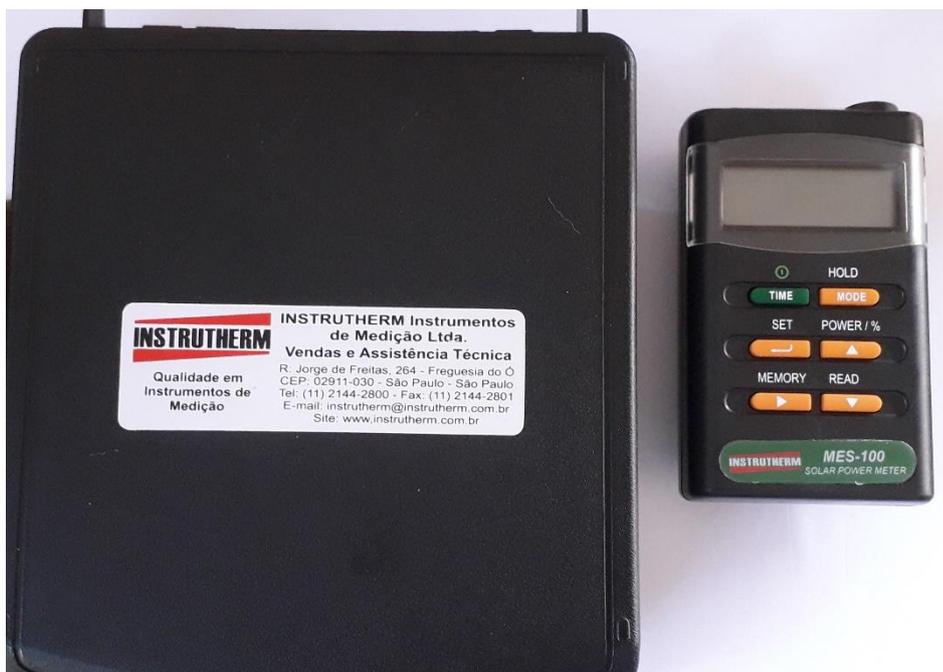
Figura 16 – Termômetro infravermelho



Fonte: Elaborado pelo autor

E para medição da radiação global foi utilizado o radiômetro Instrutherm MES-100 – solar power meter, apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Radiômetro Instrutherm MES-100



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Procedimento experimental

Os testes foram realizados em três dias, realizados com o forno sem carga, com carga e sem heliostato, e por fim, com carga e heliostato. Foram coletadas tanto as temperaturas internas e externas do forno, assim como a irradiação global, e o horário de cada medição. Com esses dados é possível realizar cálculos para obtenção da quantidade da energia de entrada, saída e a capacidade do forno de reter energia em seu interior.

3.3 Conservação de energia no forno solar

Para identificar o rendimento do forno em cada um dos três experimentos, será preciso utilizar equações em conjunto com os valores coletados através dos instrumentos, obtendo uma aproximação do rendimento térmico do aparelho.

3.3.1 Fluxo de energia de entrada no forno

O fluxo de energia de entrada do forno será a quantidade de radiação incidente direta na tampa de vidro (radiação solar global), que irá até a placa do forno; e a radiação refletida pelo heliostato (radiação solar direta refletida). Nos

casos em que o heliostato não estiver sendo utilizado, a radiação solar direta refletida será igual a zero. Logo a energia total de entrada no forno é dada por:

$$\dot{E}_e = \dot{E}_{sg} + \dot{E}_{sr} \quad (1)$$

Sendo:

\dot{E}_e = taxa de energia de entrada recebida pelo forno (W);

\dot{E}_{sg} = taxa de energia que incide diretamente no forno por radiação solar global (W);

\dot{E}_{sr} = taxa de energia que incide indiretamente pela superfície refletida (W).

Para o cálculo de cada uma das taxas de energia que entram no forno, tem-se:

$$\dot{E}_{sg} = I_g A_v \tau_v \quad (2)$$

$$\dot{E}_{sr} = I_r A_h \tau_v \rho_h \quad (3)$$

Cada um desses termos são descritos por:

I_g = Índice de radiação solar global incidente diretamente ao forno (W/m²);

I_r = Índice de radiação indireta pela superfície refletida até o forno (W/m²);

A_v = Área do vidro (m²);

A_h = Área do heliostato (m²);

τ_v = Transmissividade do vidro;

ρ_h = Reflexividade do heliostato.

3.3.2 Fluxo de energia perdida para o ambiente

Pela troca de energia com o ambiente externo, constantemente haverá perda de energia através das paredes do forno e também pela sua entrada de vidro, a determinação da taxa de energia perdida, será analisada por meio de convecção e radiação, logo:

$$\dot{E}_p = \dot{E}_{pn} + \dot{E}_{ps} + \dot{E}_{pl} + \dot{E}_{po} + \dot{E}_{pv} + \dot{E}_{pf} \quad (4)$$

Em que:

\dot{E}_p = Fluxo de energia total perdida para o ambiente (W);

\dot{E}_{pn} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pela superfície norte (W);

\dot{E}_{ps} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pela superfície sul (W);

\dot{E}_{pl} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pela superfície leste (W);

\dot{E}_{po} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pela superfície oeste (W);

\dot{E}_{pv} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pela superfície de vidro (W);

\dot{E}_{pf} = Fluxo de energia perdida para o ambiente pelo fundo do forno (W).

É considerado que pelas paredes do forno, o calor será perdido por convecção, já pela superfície de vidro, será perdido tanto por convecção, quanto por radiação. Para convecção será utilizada a Lei de Newton para o Resfriamento, enquanto para radiação é aplicada a lei de Stefan-Boltzmann, obtendo-se:

$$\dot{E}_{p(\text{convecção})} = h_c A_s (T_s - T_{amb}) \quad (5)$$

$$\dot{E}_{p(\text{radiação})} = h_r A_s (T_s - T_{amb}) \quad (6)$$

Sendo:

$\dot{E}_{p(\text{convecção})}$ = Fluxo de energia perdida por convecção (W);

$\dot{E}_{p(\text{radiação})}$ = Fluxo de energia perdida por radiação (W);

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K);

h_r = Coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m²K);

A_s = Área da superfície (m²);

T_s = Temperatura da superfície (K);

T_{amb} = Temperatura ambiente (K).

Segundo Spinelli (2016), de acordo com a central meteorológica do LMHES a velocidade do vento situa-se entre 0 e 2,00 m/s. Para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, que existe entre a superfície externa e o ar ambiente, segundo Duffie e Beckman (1991) com a velocidade do vento entre 0 e 7,00 m/s é possível utilizar a seguinte equação:

$$h_{c(v)} = 2,8 + 3V_v \quad (7)$$

Para:

$h_{c(v)}$ = Coeficiente de transferência de calor por convecção relativo à velocidade do vento (W/m²K);

V_v = Velocidade do vento (m/s).

Para que a grandeza física de $h_{c(v)}$ fique em W/m^2K , a equação 7 é multiplicada por $\frac{W.s}{m^3K}$.

Já o coeficiente de transferência de calor por radiação, também segundo Duffie e Beckman (1991), é determinado como:

$$h_{r(v)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{T_{ve}^4 - T_{sky}^4}{T_{ve} - T_{amb}} \right) \quad (8)$$

Em que os termos são descritos por:

$h_{c(v)}$ = Coeficiente de transferência de calor por radiação entre a superfície externa e o ambiente (W/m^2K);

T_{ve} = Temperatura externa do vidro (K);

T_{sky} = Temperatura da abóbada celeste (K);

T_{ve} = Temperatura externa do vidro (K);

Para que a grandeza física de $h_{r(v)}$ fique em W/m^2K , a equação 8 é multiplicada por $\frac{W}{m^2K^4}$.

Para determinação da temperatura da abóbada celeste, a partir da temperatura ambiente, tem-se:

$$T_{sky} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (9)$$

3.3.3 Rendimento térmico

Para o rendimento térmico interno do forno solar, será através da razão do fluxo de energia absorvido pelo forno solar pelo fluxo de energia fornecido ao forno, logo:

$$\eta_{forno} = \frac{\dot{E}_{abs}}{\dot{E}_e} \quad (10)$$

Sendo:

η_{forno} = Rendimento térmico interno do forno solar;

\dot{E}_{abs} = Fluxo de energia absorvido pelo forno solar (W).

Pela conservação da energia, \dot{E}_{abs} pode ser calculado por:

$$\dot{E}_{abs} = \dot{E}_e - \dot{E}_p \quad (11)$$

4 Resultados e Discussões

Para demonstrar a influência do heliostato no forno solar, foram realizados testes primeiramente sem o uso do heliostato, com o forno sem carga e também com carga; posteriormente, foi inserido o heliostato no forno e testado com carga. Em cada uma das situações será quantificada a quantidade de energia recebida, absorvida e perdida, para que seja possível comparar a influência que o heliostato acarreta no processo de cocção.

4.1 Teste sem carga e sem heliostato

Para o teste sem carga, o forno foi exposto ao Sol no dia 08 de abril de 2021 às 10h45, iniciando a coleta das temperaturas após 15 minutos. Foi feita a medição a cada 15 minutos no intervalo entre 11h00 e 12h45, tendo um total de 8 amostras. A temperatura ambiente e sensação térmica estavam respectivamente iguais a 30 °C e 34°C. Na Tabela 1 têm-se os dados coletados do teste sem carga e sem heliostato.

Tabela 1 – Temperaturas do forno e irradiação global, teste sem carga e sem heliostato

Horário	T _P (°C)	T _A (°C)	T _S (°C)	T _L (°C)	T _O (°C)	T _N (°C)	T _F (°C)	T _V (°C)	I _g (W/m ²)
11h00	71,7	49,1	33,2	33,7	31,4	31,8	32,5	38,7	1015
11h15	75,3	52,1	35,4	34,2	32,4	33,2	33,3	39,5	1100
11h30	76,1	53,6	36,8	36,5	34,9	34,7	34	41,7	1052
11h45	77,5	53,4	39,1	39,1	35,3	37,3	35,1	46,2	1020
12h00	68,3	47,8	38,8	41,5	37,9	41,8	36,2	43,7	983
12h15	54	42,5	39,9	38,3	36,8	39	36,2	38,5	830
12h30	47,4	38,4	36,6	34,8	33,2	34,6	34,2	34,7	960
12h45	73	51,3	36,6	37,8	36,1	36,6	36,1	39,5	950
Média	67,91	48,52	37,05	36,98	34,75	36,12	34,70	40,31	988,75

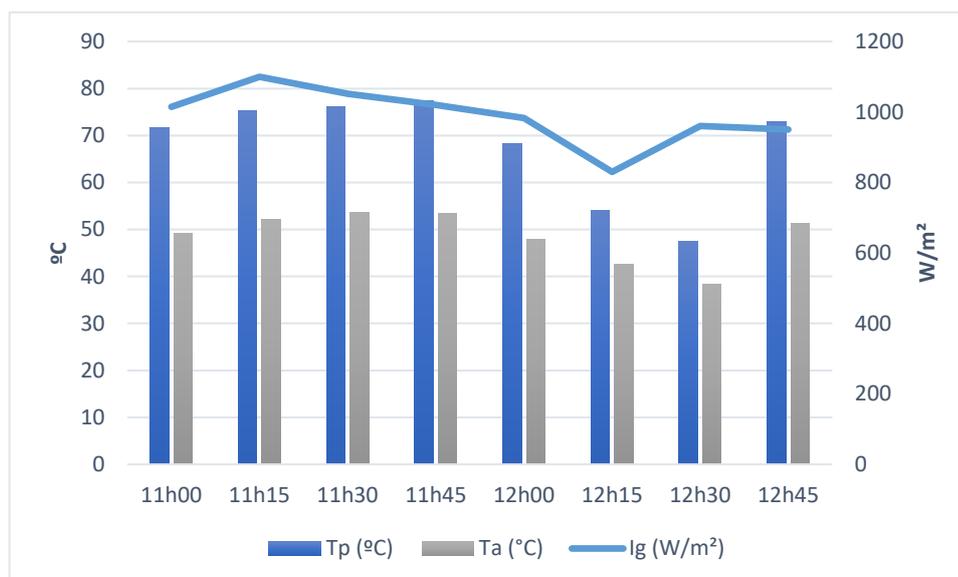
Fonte: Elaborado pelo autor

Em que T_p, T_a, T_s, T_l, T_o, T_n, T_f e T_v são as temperaturas em °C respectivamente da placa, ar, área externa sul, área externa leste, área externa oeste, área externa norte, fundo do forno e da tampa de vidro. Enquanto I_g é o índice de radiação solar global.

Durante a manhã foi obtido uma média de 988,75 W/m² de irradiação global, a partir das 12h15 o céu ficou parcialmente nublado, isso fez com que a irradiação tivesse valores abaixo de 1000 W/m².

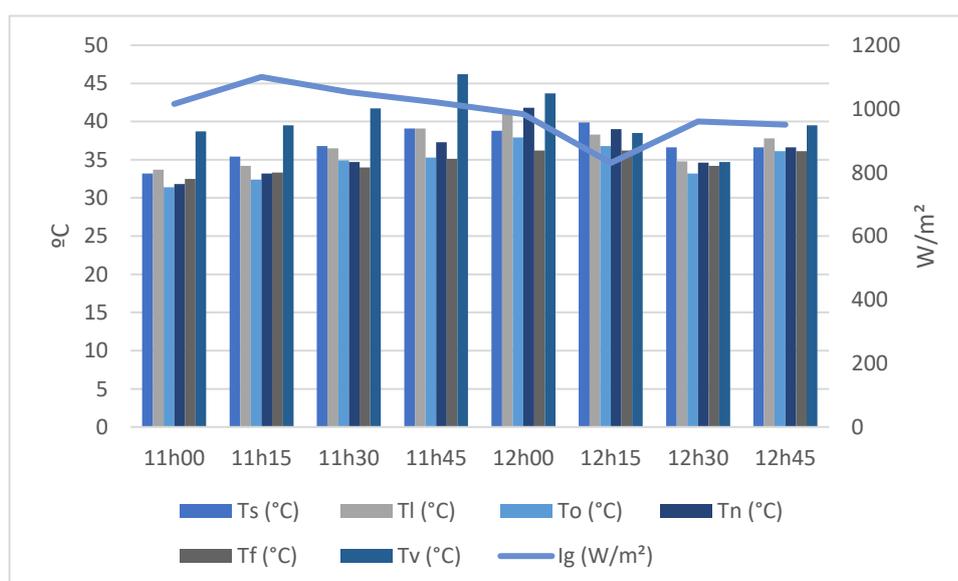
A partir da Tabela 1, foi possível gerar os gráficos a seguir. No Gráfico 1 têm-se as variações das temperaturas do ar, temperaturas da placa e da irradiação global em função do tempo e no Gráfico 2, a variação das demais temperaturas em função do tempo.

Gráfico 1 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno sem carga e sem heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno sem carga e sem heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Teste com carga e sem heliostato

O teste com carga, foi realizado no dia 09 de abril de 2021, iniciando às 10h45. Os dados foram coletados assim que o forno foi exposto. Foi feita a medição a cada 15 minutos no intervalo entre 10h45 e 13h15, tendo um total de 11 amostras. A temperatura ambiente e sensação térmica estavam respectivamente iguais a 29 °C e 33°C. Foi colocado no forno solar uma pizza com massa igual a 460g, conforme a Figura 18 e os dados coletados, conforme a Tabela 2.

Figura 18 – Forno solar com carga para início do teste



Fonte: Elaborado pelo autor

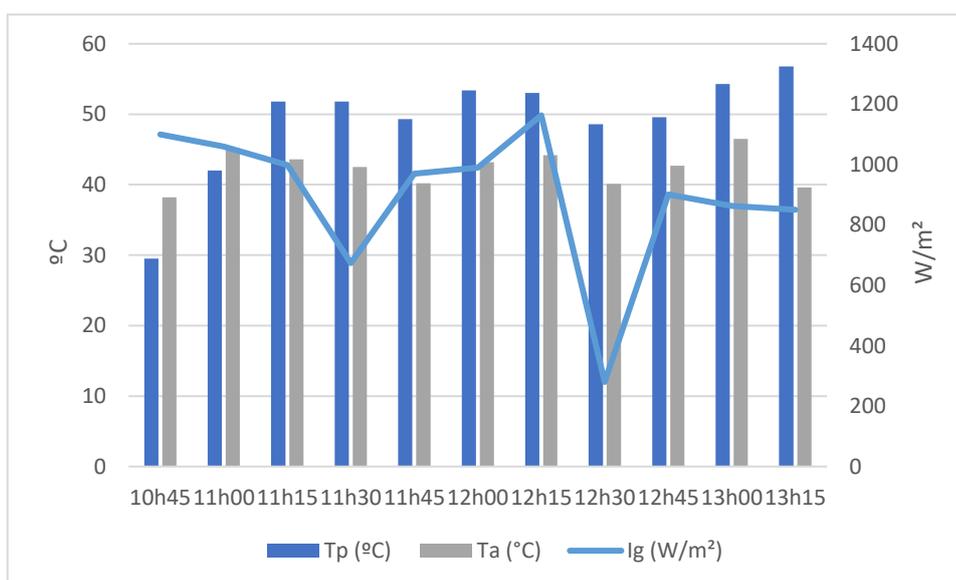
Tabela 2 – Temperaturas do forno e irradiação global, teste com carga e sem heliostato

Horário	T _P (°C)	T _A (°C)	T _S (°C)	T _L (°C)	T _O (°C)	T _N (°C)	T _F (°C)	T _V (°C)	I _g (W/m ²)
10h45	29,5	38,2	30,9	30,9	30,6	29,5	30,2	36,2	1100
11h00	42	45,2	34	33,3	32,5	32,2	33,4	34,1	1060
11h15	51,8	43,6	36,6	35,7	33,6	34,2	35,3	34,5	998
11h30	51,8	42,5	38,6	37,1	35,4	36,1	37,1	35	674
11h45	49,3	40,2	36,7	36,8	34,5	35,4	36,3	32,9	970
12h00	53,4	43,2	38,5	38,1	36,6	37,9	38	36,1	990
12h15	53	44,2	38,3	39,6	36,7	37	37,9	35,5	1163
12h30	48,6	40,1	38,4	38,7	37,6	37,8	38	35,4	280
12h45	49,6	42,7	37,5	40,4	35,3	35,4	37	34,2	901
13h00	54,3	46,5	37,9	42,6	35,6	36,1	37,5	36,2	863
13h15	56,8	39,6	38,2	45,5	36,9	35,8	37,4	36,1	850
Média	49,10	42,36	36,87	38,06	35,02	35,21	36,19	35,10	895,36

Fonte: Elaborado pelo autor

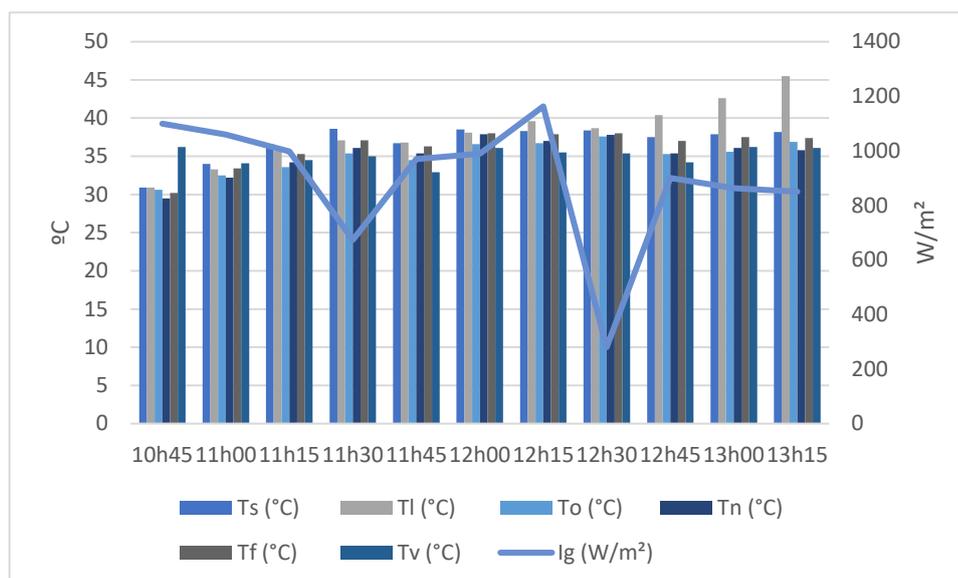
O teste foi realizado em um intervalo de 2h30, com uma irradiação global média igual a 895,364 W/m². Em determinados intervalos de tempo, a irradiação ficou muito abaixo do que o esperado, como por exemplo às 12h30, quando o valor detectado foi igual a 280 W/m² (tempo nublado com pequena precipitação de água). O forno teve uma temperatura média na placa igual a 49,10 °C, enquanto a temperatura do ar ficou igual a 42,36 °C. A partir da Tabela 2, os Gráficos 3 e 4 foram gerados.

Gráfico 3 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e sem heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e sem heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar do longo intervalo de tempo exposto no forno solar, o forno não atingiu uma temperatura suficiente para realizar o assamento da pizza, durante 150 minutos o alimento estava aquecido, porém não no ponto correto para consumo.

4.3 Teste com carga e com heliostato

Como último teste, para realizar o impacto energético do heliostato no forno solar, no dia 10 de abril de 2021, com uma temperatura ambiente aproximada de 30 °C, no período entre 11h15 e 12h00 foi realizado o teste do forno com uma pizza de 460g no mesmo forno, mas agora com o heliostato posicionado, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Forno solar com carga para início do teste



Fonte: Elaborado pelo autor

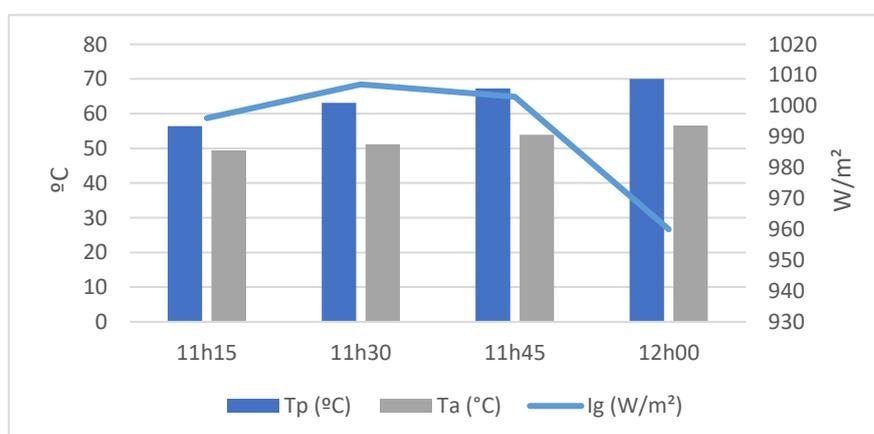
Vê-se que com o auxílio do heliostato o forno conseguiu fornecer uma temperatura média da placa e do ar iguais a 64,2 °C e 52,77 °C. A Tabela 3 possui os dados coletados durante o assamento e a partir dos dados foram gerados os Gráficos 5 e 6.

Tabela 3 – Temperaturas do forno, irradiação global e irradiação direta, teste com carga e com heliostato

Horário	T_P (°C)	T_A (°C)	T_S (°C)	T_L (°C)	T_O (°C)	T_N (°C)	T_F (°C)	T_V (°C)	I_g (W/m ²)	I_d (W/m ²)
11h15	56,4	49,4	35,4	32,1	34	37,2	33,4	36,5	996	796,8
11h30	63,1	51,2	36,3	34,3	37	37,3	36,2	41	1007	805,6
11h45	67,3	53,9	39,7	36,1	40,6	43,9	38,7	44,5	1003	802,4
12h00	70,0	56,6	38,5	34,5	42,7	41,3	39,5	42,1	960	768
Média	64,2	52,77	37,47	34,25	38,57	39,92	36,95	41,02	991,5	793,20

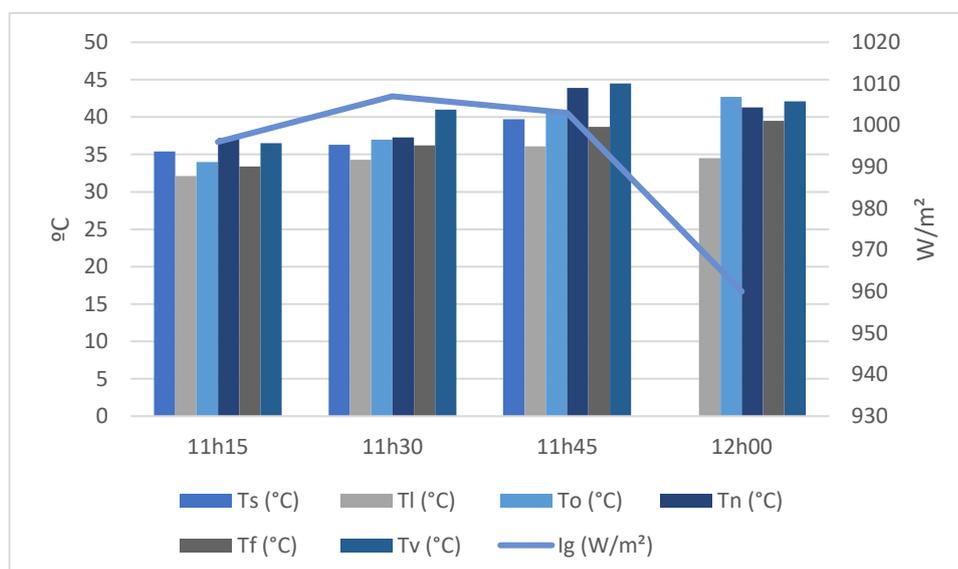
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 – Variação da temperatura da placa, temperatura do ar e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e com heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 – Variação das demais temperaturas e irradiação global em função do tempo – Forno com carga e com heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

Após 45 minutos a pizza foi retirada do forno já pronta para o consumo, identificou-se que a massa estava bastante ressecada e que poderia ter requerido um menor tempo de cocção, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Pizza após 45 minutos assando no forno com heliostato



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Cálculo do balanço energético do forno solar

Para determinar a eficiência do forno em cada um dos testes, será feito o cálculo da entrada de energia, da energia perdida e absorvida. Para isso, alguns dos valores utilizados são constantes, como as áreas das superfícies do forno, transmissividade do vidro, dentre outros, demonstrados na tabela a seguir:

Tabela 4 – Valores de constantes

A_v	0,24 m ²
A_h	0,24 m ²
A_N	0,054 m ²
A_S	0,054 m ²
A_L	0,036 m ²
A_O	0,036 m ²
A_F	0,24 m ²
τ_v	0,85
ρ_h	0,95
V_v	1,0 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.1 Balanço energético – Forno sem carga e sem heliostato

Para o primeiro cálculo energético serão utilizados os valores das Tabelas 1 e 4, assim como as equações descritas na metodologia.

4.4.1.1 Fluxo de energia de entrada – Forno sem carga e sem heliostato

Por ser o modelo sem heliostato, o fluxo de energia de entrada total será igual a taxa de energia que incide diretamente no forno solar por radiação global, então combinando as Equações (1) e (3), com o valor médio do índice de radiação global incidente médio da Tabela 1, tem-se:

$$\dot{E}_{e(1)} = I_{g(1)} A_v \tau_v = 988,75 \frac{W}{m^2} 0,24 m^2 0,85$$

$$\dot{E}_{e(1)} = 201,70 W$$

4.4.1.2 Fluxo de energia perdido para o ambiente – Forno sem carga e sem heliostato

Para determinar as perdas de energia por convecção e radiação, serão utilizadas as Tabelas 1 e 4, com os valores médios da Tabela 1, temperatura ambiente igual a 30 °C (303,15 K) e as Equações (4) até (9). Determinando o h_c e h_r :

$$h_{c(1)} = h_{c(v1)} = 2,8 + 3V_v = 2,8 \frac{W}{m^2K} + 3 \left(1,0 \frac{m}{s} \right) \frac{Ws}{m^3K}$$

$$h_{c(1)} = 5,8 \frac{W}{m^2K}$$

$$h_{r(1)} = h_{r(v1)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{T_{ve(1)}^4 - T_{sky(1)}^4}{T_{ve(1)} - T_{amb(1)}} \right)$$

$$\text{Para } T_{sky(1)} = 0,0552 T_{amb(1)}^{1,5} = 0,0552 (303,15 K)^{1,5} = 291,36 K$$

$$h_{r(1)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{(313,46 K)^4 - (291,36 K)^4}{313,46 K - 303,15 K} \right) \frac{W}{m^2K^4}$$

$$h_{r(1)} = 12,25 \frac{W}{m^2K}$$

Calculados os coeficientes de transferência de calor, é possível determinar a quantidade do fluxo de energia perdido por cada superfície com o meio, assim como todo o fluxo de energia perdido, conforme a Tabela 5:

Tabela 5 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno sem carga e sem heliostato

$\dot{E}_{pN(1)}$	$\dot{E}_{pS(1)}$	$\dot{E}_{pL(1)}$	$\dot{E}_{pO(1)}$	$\dot{E}_{pF(1)}$	$\dot{E}_{pV(c1)}$	$\dot{E}_{pV(r1)}$	$\dot{E}_p(1)$
1,92	2,21	1,46	0,99	6,54	14,35	30,31	57,78

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.1.3 Fluxo de energia absorvido e rendimento térmico – Forno sem carga e sem heliostato

O fluxo de energia absorvido pelo forno será a diferença entre o fluxo de energia de entrada e o fluxo de energia perdido, então utilizando as Equações (10) e (11), obtém-se:

$$\dot{E}_{abs(1)} = \dot{E}_{e(1)} - \dot{E}_{p(1)} = (201,70 - 57,78)W$$

$$\dot{E}_{abs(1)} = 143,92 W$$

Com isso o rendimento térmico do forno é calculado por:

$$\eta_{forno(1)} = \frac{\dot{E}_{abs(1)}}{\dot{E}_{e(1)}} = \frac{143,92 W}{201,70 W}$$

$$\eta_{forno(1)} = 0,714$$

Sem o heliostato e sem carga, o forno absorveu 143,92 W e obteve um rendimento térmico igual a 71,4%.

4.4.2 Balanço energético – Forno com carga e sem heliostato

Como dados para realizar os cálculos, serão utilizadas as Tabelas 2 e 4, temperatura ambiente igual a 29 °C (302,15 K) e as equações descritas na metodologia.

4.4.2.1 Fluxo de energia de entrada – Forno com carga e sem heliostato

Por não ter em sua estrutura o heliostato, todo o fluxo de energia de entrada do forno será fornecido pela radiação global incidente diretamente ao forno, segue:

$$\dot{E}_{e(2)} = I_{g(2)} A_v \tau_v = 895,36 \frac{W}{m^2} 0,24 m^2 0,85$$

$$\dot{E}_{e(2)} = 182,65 W$$

4.4.2.2 Fluxo de energia perdido para o ambiente – Forno com carga e sem heliostato

O coeficiente de transferência de calor por convecção será igual para todos os casos, considerando que a velocidade média do vento permaneceu em 1,0 m/s ($h_{c(1)} = h_{c(2)} = 5,8 \frac{W}{m^2 K}$), então será preciso determinar ainda o coeficiente de transferência por radiação, nesse caso temos:

$$h_{r(2)} = h_{r(v2)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{T_{ve(2)}^4 - T_{sky(2)}^4}{T_{ve(2)} - T_{amb(2)}} \right)$$

$$\text{Para } T_{sky(2)} = 0,0552 T_{amb(2)}^{1,5} = 0,0552 (302,15 K)^{1,5} = 289,92 K$$

$$h_{r(2)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{(308,25 K)^4 - (289,92 K)^4}{308,25 K - 302,15 K} \right) \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$h_{r(2)} = 16,61 \frac{W}{m^2 K}$$

Determinado cada parcela do fluxo de energia perdido pelas superfícies para o meio e o seu total perdido encontra-se na Tabela 6:

Tabela 6 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno com carga e sem heliostato

$\dot{E}_{pN(2)}$	$\dot{E}_{pS(2)}$	$\dot{E}_{pL(2)}$	$\dot{E}_{pO(2)}$	$\dot{E}_{pF(2)}$	$\dot{E}_{pV(c2)}$	$\dot{E}_{pV(r2)}$	$\dot{E}_{p(2)}$
1,94	2,46	1,89	1,26	10,01	8,49	24,32	50,37

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2.3 Fluxo de energia absorvido e rendimento térmico – Forno com carga e sem heliostato

Quantificado o fluxo de energia de entrada e perdido do forno, através da conservação da energia, tem-se o fluxo de energia absorvido pelo forno:

$$\dot{E}_{abs(2)} = \dot{E}_{e(2)} - \dot{E}_{p(2)} = (182,65 - 50,37)W$$

$$\dot{E}_{abs(2)} = 132,28 W$$

Com isso o rendimento térmico do forno para o segundo teste é:

$$\eta_{forno(2)} = \frac{\dot{E}_{abs(2)}}{\dot{E}_{e(2)}} = \frac{132,28 W}{182,65 W}$$

$$\eta_{forno(2)} = 0,724$$

Sem o heliostato e com carga, o forno absorveu 132,28 W e obteve um rendimento térmico igual a 72,4%.

4.4.3 Balanço energético – Forno com carga e com heliostato

O balanço de energia para essa situação foi com os dados das Tabelas 3 e 4, considerando que a temperatura média ambiente estava igual a 30 °C (303,15 K).

4.4.3.1 Fluxo de energia de entrada – Forno com carga e com heliostato

Para essa terceira situação, o fluxo de energia de entrada será a soma da taxa de energia que incide diretamente no forno e a taxa que incide indiretamente pela superfície refletida, portanto:

$$\dot{E}_{e(3)} = I_{g(3)}A_v\tau_v + I_rA_h\tau_v\rho_h = 991,5 \frac{W}{m^2}0,24 m^20,85 + 793,2 \frac{W}{m^2}0,24 m^20,850,95$$

$$\dot{E}_{e(3)} = 355,99 W$$

4.4.3.2 Fluxo de energia perdido para o ambiente – Forno com carga e com heliostato

Sabendo que $h_{c(1)} = h_{c(2)} = h_{c(3)}$, é necessário para calcular novamente um novo h_r para determinar a perda do fluxo de energia por radiação no vidro, temos:

$$h_{r(3)} = h_{r(v3)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{T_{ve(3)}^4 - T_{sky(3)}^4}{T_{ve(3)} - T_{amb(3)}} \right)$$

$$\text{Para } T_{sky(3)} = 0,0552T_{amb(3)}^{1,5} = 0,0552(303,15 K)^{1,5} = 291,36 K$$

$$h_{r(3)} = 5,16 \times 10^{-8} \left(\frac{(314,17 K)^4 - (291,36 K)^4}{314,17 K - 303,15 K} \right) \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$h_{r(3)} = 11,87 \frac{W}{m^2 K}$$

Então o fluxo de energia perdido por cada superfície do forno e o fluxo total de energia perdido é visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 – Fluxo de energia perdido em cada uma de suas superfícies (W) e o fluxo de energia total perdido (W) – Forno com carga e com heliostato

$\dot{E}_{pN(3)}$	$\dot{E}_{pS(3)}$	$\dot{E}_{pL(3)}$	$\dot{E}_{pO(3)}$	$\dot{E}_{pF(3)}$	$\dot{E}_{pV(c3)}$	$\dot{E}_{pV(r3)}$	$\dot{E}_{p(3)}$
3,11	2,34	0,89	1,79	9,67	15,34	31,39	64,53

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.3.3 Fluxo de energia absorvido e rendimento térmico – Forno com carga e com heliostato

Pela conservação da energia, o fluxo de energia absorvido pelo forno no último teste foi:

$$\dot{E}_{abs(3)} = \dot{E}_{e(3)} - \dot{E}_{p(3)} = (355,99 - 64,53)W$$

$$\dot{E}_{abs(3)} = 291,46 W$$

Sendo assim, o rendimento térmico do forno com o heliostato é:

$$\eta_{forno(3)} = \frac{E_{abs(3)}}{E_{e(3)}} = \frac{291,46 W}{355,99 W}$$

$$\eta_{forno(3)} = 0,819$$

Com o heliostato, o forno absorveu 291,46 W e obteve um rendimento térmico igual a 81,9%.

4.5 Análise dos resultados

Comparando os resultados do forno com a carga, observando a diferença das propriedades termodinâmicas do forno com e sem o heliostato, através da análise do balanço de energia do forno solar nos testes, tem-se a Tabela 8.

Tabela 8 – Fluxos de energia e rendimentos do sistema sem e com heliostato

	Sem heliostato	Com heliostato
$\dot{E}_e(W)$	182,65	355,99
$\dot{E}_p(W)$	50,37	64,53
$\dot{E}_{abs}(W)$	132,28	291,46
$\eta_{forno}(\%)$	72,4	81,9

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o heliostato o forno solar teve um ganho de 9,5% no rendimento térmico, uma influência considerável obtida pelo seu uso, devido à taxa de radiação que incide indiretamente na superfície, o que propicia o melhor aproveitamento do forno como um todo.

O fluxo de energia perdido por cada uma das superfícies é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Porcentagem do fluxo de energia perdido em cada uma das superfícies do sistema sem e com equipamento

	Sem heliostato	Com heliostato
$\dot{E}_{pN}(\%)$	3,85	4,82
$\dot{E}_{pS}(\%)$	4,89	3,63
$\dot{E}_{pL}(\%)$	3,75	1,38
$\dot{E}_{pO}(\%)$	2,50	2,77
$\dot{E}_{pF}(\%)$	19,87	14,99
$\dot{E}_{pV}(\%)$	65,14	72,42

Fonte: Elaborado pelo autor

O maior percentual de energia perdida em ambos os casos foi na superfície de vidro, nessa região ocorre uma maior transferência de calor com o ambiente, pois há, nesse local, a ocorrência de trocas convectivas e radiativas. Além disso, a área da superfície é muito grande em relação às outras faces, fazendo com que a taxa de perda seja ainda maior.

Nessa região a tentativa de minimização da perda é dificultosa, pois é também por ela que incide toda a radiação direta e indireta para a cocção do alimento.

Com o objetivo de alcançar maiores temperaturas no interior do forno e na placa para obter a cocção, a configuração do forno com o heliostato apresentou

temperaturas médias e máximas superiores do que a configuração sem a superfície espelhada, tais valores são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Temperaturas da placa e do ar do sistema sem e com heliostato

	Sem heliostato	Com heliostato
$T_{P(máx)}(^{\circ}C)$	56,8	70
$T_{P(méd)}(^{\circ}C)$	49,1	64,2
$T_{ar(máx)}(^{\circ}C)$	46,5	56,6
$T_{ar(méd)}(^{\circ}C)$	42,36	52,77

Fonte: Elaborado pelo autor

A temperatura máxima da placa com o heliostato foi igual a 70,00 °C, obtendo uma diferença de 13,20 °C quando ausente a taxa de radiação indireta. O resultado é mais satisfatório quando é analisada a média da temperatura da placa, pois com o heliostato a média foi igual a 64,2 °C, ou seja, 15,10 °C acima.

Para a temperatura do ar, a diferença foi menor, mas ainda significativa, a diferença entre a temperatura máxima do ar e a temperatura média do ar da configuração do heliostato e sem ele foram respectivamente 10,10 °C e 10,41 °C. O que significa que o heliostato é necessário para que no interior do interior do forno a temperatura seja suficiente para realizar a cocção do alimento e não somente aquecê-lo, que foi o que ocorreu quando ele não foi utilizado.

5 Conclusões

Após os experimentos foi constatado que o heliostato é fundamental para o funcionamento do forno, com ele é possível alcançar temperaturas que possibilitam a cocção do alimento. Apesar da configuração sem o heliostato possuir um rendimento térmico alto ($\eta_{forno(2)} = 72,4\%$), o forno apenas atinge temperaturas suficientes para aquecer o alimento, não criando, dessa forma, uma atmosfera ideal para o assamento.

A configuração com o heliostato obteve um rendimento igual a 81,9%, porém esse rendimento é associado a energia absorvida pelo forno, ou seja, nem toda energia absorvida será aplicada diretamente no alimento, já que parte dessa energia estará no ar e nas paredes internas do forno, diminuindo a eficiência da cocção em si.

Desse modo, para melhorar a cocção, pode-se optar pela colocação de mais heliostatos, ao redor do forno, em uma configuração semelhante a dos fornos solares do tipo funil, o que resultará no aumento da taxa de energia que incide indiretamente sobre ele, pelas superfícies reflexivas, implicando, assim, no aumento do seu rendimento.

6 Referências

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Evolução dos preços de GLP (R\$ / botijão de 13 kg)**. 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/atuacao/pdc/pr/pcc/2020-margens-P13-tabela.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2021.

ARPROTEC. **Estufa de Cozimento Multi Fan - Plug**. Disponível em: <http://arprotec.com.br/produtos/estufas-de-cozimento/estufa-de-cozimento-multifan-plug/>. Acesso em: 01 abr. 2021

CAATINGA, No Clima da. **Cartilha do Forno Solar**. 2019. Elaborado por Gilson Miranda do Nascimento. Disponível em: https://issuu.com/climadacaatinga/docs/cartilha_forno_solar. Acesso em: 12 abr. 2021.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2012. 904 p.

COLLET, Luciana. **Uso de energia solar no Brasil tem aumento de 14,4% no 1º trimestre**. 2020. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,uso-de-energia-solar-no-brasil-tem-aumento-de-14-4-no-1-trimestre,70003273027>. Acesso em: 31 mar. 2021.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 2ª Edição, John Wiley & Sons: New York, 1991.

DUTRA, Cynthia Beatriz Scheffer; RODRIGUES, Jean Paulo; SEDOR, Paulo César. Otimização da Absorção de Energia Solar com o Uso de Placas Fotovoltaicas e Refletores Móveis. In: COTIAN, Luís Fernando Paulista. **Engenharias, Ciência e Tecnologia 3**. 3. ed. Ponta Grossa/Pr: Atena Editora, 2019. Cap. 11. p. 157-166. Disponível em:

<https://www.finersistemas.com/atenaeditora/index.php/admin/api/artigoPDF/5873>.

Acesso em: 01 abr. 2021.

GONCALVES, Maria Helena; ARAUJO, Luis E. E. de; RODRIGUES, Varlei. Lentes de gelatina. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 42, e20190095, 2020 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172020000100506&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 07 de abril de 2021.

Governo do Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Uso de fontes renováveis no Brasil é três vezes maior que o mundial.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/07/uso-de-fontes-renovaveis-no-brasil-e-tres-vezes-maior-que-o-mundial#:~:text=A%20energia%20solar%20cresceu%2092,das%20fam%C3%ADlias%2C%20renovabilidade%20e%20seguran%C3%A7a>. Acesso em: 02 abr. 2021.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS - Principais resultados.** 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=destaques>. Acesso em: 06 de abril de 2021.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JEWETT , John W. Jr.; SEARWAY, Raymond A.. **Física para Cientistas e Engenheiros:** luz, óptica e física moderna. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012. 398 p.

KALOGIROU, Soteris. **Solar energy engineering: processes and systems.** 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014. 819 p.

LIMA, Camila Machado; CAMURÇA, Lia Carolina Vasconcelos. **Os entraves para o desenvolvimento das energias renováveis no Brasil**: uma abordagem sobre o incentivo à inovação tecnológica. Uma abordagem sobre o incentivo à inovação tecnológica. 2017. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/58916/os-entraves-para-o-desenvolvimento-das-energias-renovaveis-no-brasil>. Acesso em: 02 abr. 2021.

MOURA, Johnson Pontes de. **Construção e avaliação térmica de um fogão solar tipo caixa**. 2007. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Cap. 3.

NERY, Carmen. **Extrema pobreza atinge 13,5 milhões de pessoas e chega ao maior nível em 7 anos**. 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/25882-extrema-pobreza-atinge-13-5-milhoes-de-pessoas-e-chega-ao-maior-nivel-em-7-anos>. Acesso em: 03 abr. 2021

PRADO, Antonio Fernando Bertachini de Almeida; KUGA, Helio Koiti. **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos: Inpe, 2001. 220 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Esquema-mostrando-os-efeitos-da-radiacao-incidente_fig16_43655142. Acesso em: 2 abr. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. INPE, São José dos Campos, 2017

SCI, Solar Cookers International. **Princípio dos processos de fogões solares de caixa**. Elaborada por Mark Aalfs. Disponível em: <http://solarcooking.org/portugues/sbcdes-pt.htm>. Acesso em: 04 abr. 2021.

SCI, Solar Cookers International. **Why Solar Cooking**. 2018. Disponível em: <https://www.solarcookers.org/why>. Acesso em: 02 abr. 2021.

SILVA, L. F. **Fabricação e estudo de um forno solar tipo caixa para assamento de alimentos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

SILVA, Marielen de Lima. **Efeito de dois métodos de cocção – água e vapor – nos parâmetros de qualidade do músculo semitendinosos**. 2004. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-29042005-153057/publico/marielen.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2020.

SILVA, Francisco Santiago Pereira da. **Fabricação de um fogão solar tipo caixa a partir de um material compósito**. 2020. 14 f. Artigo (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SPINELLI, Mário César de Oliveira. **Fabricação e estudo de um forno solar tipo caixa com capacidade simultânea de assamento de vários alimentos**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

TERMOCON, Engenharia. **Isolamento térmico: forno industrial**: produtos de isolamento térmico: forno industrial. Produtos de isolamento térmico: forno industrial. Disponível em: <https://www.termocom.com.br/isolamento-termico-forno-industrial>. Acesso em: 01 abr. 2021

TIGRE, Antonio A.S., **Introdução à Energia Solar: Heliotérmica e Fotovoltaica**. 2020. 36f. Trabalho derivado de monografia com estudo de caso. – Engenharia Elétrica e Eletrônica, Centro Universitário Estácio de São Paulo, São Paulo, 2020.

WWF-BRASIL. **O que é desenvolvimento sustentável?** Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/?gclid=CjwKCAjw3pWDBhB3EiwAV1c5rKpkil0omUv7KK3ws-BQR78TNt52xvVGM1fp7rE723-Pou_cTlt6RRoCkcoQAvD_BwE. Acesso em: 02 abr. 2021.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Natal, 30 de abril de 2021.

Ao(s) **trinta** dia(s) do mês de **abril** do ano de **dois mil e vinte e um**, às **onze horas, na plataforma google meet**, instalou-se a banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso do aluno **DANIEL FERREIRA FRANÇA**, matrícula **20180009743**, do curso de Engenharia Mecânica. A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: **LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA**, orientador; **JACIEL CARDOSO DE LIMA**, examinador externo; **RAIMUNDO VICENTE PEREIRA NETO**, examinador externo. Deu-se início à abertura dos trabalhos pelo **LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA**, que após apresentar os membros da banca examinadora, solicitou a (o) candidato (a) que iniciasse a apresentação do trabalho de conclusão de curso, intitulado **“ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DE UM HELIOSTATO EM UM FORNO SOLAR TIPO CAIXA”**, marcando um tempo de trinta minutos para a apresentação. Concluída a exposição, **LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA**, orientador, passou a palavra aos examinadores para arguirem o(a) candidato(a); após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido **APROVADO**, o(a) candidato(a), conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A versão final do trabalho deverá ser entregue à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, no prazo de **7** dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o que rege o Projeto Político Pedagógico do Curso de Engenharia Mecânica da UFRN, o(a) candidato(a) não será o aprovado(a) se não cumprir as exigências acima.

LUIZ GUILHERME MEIRA DE SOUZA
Orientador

JACIEL CARDOSO DE LIMA
Examinador externo

RAIMUNDO VICENTE PEREIRA NETO
Examinador externo