

**INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRIQUE FERREIRA VIEIRA
THIAGO DA SILVA DELUNARDO**

PROJETO DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE FOGÃO A LENHA

Aracruz

2023

**HENRIQUE FERREIRA VIEIRA
THIAGO DA SILVA DELUNARDO**

PROJETO DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DE FOGÃO A LENHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ivanor Martins da Silva
Co-orientador: Prof. Me. Artur Saturnino Rodrigues

Aracruz

2023

(Biblioteca do Campus Aracruz)

V658p

Vieira, Henrique Ferreira.

Projeto de melhoria de eficiência do fogão a lenha tradicional / Henrique Ferreira Vieira, Thiago da Silva Delunardo. - 2023.

44 f. : il.

Orientador: Ivanor Martins da Silva

Coorientador: Artur Saturnino Rodrigues

TCC (Graduação) Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, Engenharia Mecânica, 2023.

1. Fogões a lenha. 2. Madeira como combustível. 3. Combustão. 4. Calor - Armazenamento. 5. Otimização. I. Silva, Ivanor Martins da. II. Rodrigues, Artur Saturnino. III. Título IV. Instituto Federal do Espírito Santo.

CDD: 536.2

Bibliotecário/a: Kelly Rita de Azevedo CRB6-ES 639

HENRIQUE FERREIRA VIEIRA
THIAGO DA SILVA DELUNARDO

**PROJETO DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DO FOGÃO A LENHA
TRADICIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica
do Instituto Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para obtenção de título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Aprovado, em 06 de Julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivanor Martins da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

Me. Artur Saturnino Rodrigues
Coorientador

Prof. Me. Alan Patrick da Silva Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof Dr. Luis Roberto Castro
Instituto Federal do Espírito Santo



Emitido em 06/07/2023

FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC Nº 8/2023 - ARA-CCEM (11.02.16.01.03.02.08)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 08/08/2023 09:27)

ALAN PATRICK DA SILVA SIQUEIRA
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
ARA-CCEM (11.02.16.01.03.02.08)
Matrícula: 2773171

(Assinado digitalmente em 04/08/2023 12:04)

IVANOR MARTINS DA SILVA
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
ARA-CCEM (11.02.16.01.03.02.08)
Matrícula: 1313491

(Assinado digitalmente em 04/08/2023 21:54)

LUIS ROBERTO CASTRO
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
VIT-CCTM (11.02.35.01.09.02.15)
Matrícula: 1619862

Visualize o documento original em <https://sipac.ifes.edu.br/documentos/> informando seu número: **8**, ano: **2023**, tipo:
FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC, data de emissão: **04/08/2023** e o código de verificação: **7ce78df266**

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Aracruz, 19 de novembro de 2023

Thiago da Silva Delunardo

Nome do autor por extenso

Henrique Geneva Vieira

Nome do autor por extenso

AGRADECIMENTO

A Deus, pela nossa vida, saúde e por nos ter ajudado a superar todas as dificuldades ao longo do curso.

Aos professores Ivanor e Artur, que dedicaram o tempo deles do início ao fim do trabalho de conclusão, sempre dispostos a tirar nossas dúvidas, dar ensinamentos e sugestões para que conseguíssemos apresentar nosso melhor desempenho.

Aos nossos pais, que deram todo o suporte para que pudéssemos focar nos estudos e assim ter a oportunidade de realizar o nosso sonho profissional.

E por fim, ao IFES Campus Aracruz, essencial no processo de formação profissional e por tudo o que aprendemos ao longo dos anos no curso.

RESUMO

Atualmente, o fogão a lenha tradicional é fabricado sem levar conceitos importantes de engenharia, e por isso, são construídos com dimensões e materiais inadequados. Em resultado disso, os fogões tradicionais, segundo as literaturas, podem apresentar uma eficiência térmica com cerca de 7%, trazendo impacto não só no desempenho do fogão, mas também, na saúde das pessoas e no meio ambiente. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um projeto de melhoria de eficiência e redução das suas dimensões. Isto inclui, o dimensionamento, seleção de materiais e orçamento de custos, de forma que o fogão proposto seja portátil e mais eficiente que o tradicional. Para isso, foram utilizados fundamentos da termodinâmica e transferência de calor para minimizar as perdas de calor para o meio externo e otimizar a energia térmica direcionada para a panela. O resultado final obtido foi um fogão a lenha portátil com uma eficiência de 29,65%.

Palavras-chave: Madeira. Otimização. Portátil. Combustão. Panela.

ABSTRACT

Nowadays, the traditional wood stove is made without taking important engineering concepts, and that's why it's built with inappropriate materials and dimensions. As a result, traditional wood stoves, according to the literature, can have a thermal efficiency of up to 7%, impacting not only the stove's performance, but also people's health and the environment. With this, the aims of this study is present a project to improve efficiency and reduce the traditional wood stove. That's includes the sizing, material selection and cost budgeting, so that the proposed stove is portable and more efficient than the traditional one. For this, fundamentals of thermodynamics and heat transfer were used to minimize the heat loss for the environment and optimize the thermal energy directed to the pot. The final result obtained was a portable wood stove with an efficiency of 29.65%.

Keywords: Wood. Optimization. Portable. Combustion. Pot.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fogão três pedras.....	10
Figura 2 - Fogão a lenha tradicional.....	10
Figura 3 - Estrutura do Fogão Rocket Stove.....	11
Figura 4 - Fogão com área transversal constante.....	11
Figura 5 - Fogão a lenha de metal melhorado.....	12
Figura 6 - Fogão tradicional na Índia feito de lama.....	12
Figura 7 - Estrutura do Fogão FLQL.....	13
Figura 8 - Fogão a lenha com saia da panela.....	13
Figura 9 - Esquema de uso da biomassa florestal.....	14
Figura 10 - Transição de escoamento laminar para escoamento turbulento.....	21
Figura 11 - Fluxograma do projeto.....	25
Figura 12 - Design do fogão projetado.....	27
Figura 13 - Distribuição das regiões para análise.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do ar seco.....	16
Tabela 2 - Equações para o cálculo da eficiência.	29
Tabela 3 – Valores iniciais para o cálculo.	29
Tabela 4 - Dimensões finais de projeto encontradas.	36
Tabela 5 - Condutividade e preço de isolantes.	37
Tabela 6 - Custo de material.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 FOGÃO A LENHA TRADICIONAL	10
2.2 FOGÕES A LENHA EFICIENTES	11
2.3 BIOMASSA	14
2.3.1 Lenha	15
2.4 COMBUSTÃO.....	15
2.4.1 Combustão com excesso de ar	16
2.4.1 Combustão da Lenha	17
2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	18
2.5.1 Condução.....	19
2.5.2 Convecção Natural.....	19
2.5.2.1 Efeitos Turbulentos	21
2.5.2.1.1 <i>Número de Nusselt</i>	22
2.5.3 Radiação	23
2.5.4 Resistências Térmicas	23
3. METODOLOGIA	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 MODELO DO FOGÃO	27
4.2 FORMA DE ANÁLISE	27
4.2.1 Método Iterativa Região 1	30
4.2.2 Considerações adotadas.....	30
4.3 ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS	31

4.4 CUSTO	37
5. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

O ato de cozinhar é uma prática muito comum no dia a dia de toda população. Em que, um dos meios mais antigas no mundo, é o emprego de biomassa para a cocção de alimentos (FERREIRA, 2017).

Atualmente, a lenha ainda é muito empregada como forma de combustível. No Brasil, ela representa 26,1% do consumo residencial, no qual a produção de alimentos consiste em grande parte da sua utilização. Isto mostra sua alta relevância, quando comparado ao gás liquefeito de petróleo (GLP), que abrange 22,9% (EPE, 2022). Assim como, estima-se que em 2024 o consumo de lenha pelas residências brasileiras como fonte de energia chegue a cerca de 7 milhões unidades (EPE, 2016) (GIODA, 2019).

No entanto, o fogão a lenha tradicionalmente construído, apesar de possuir vantagens em comparação ao fogão a gás, como: combustível sustentável, se o manuseio for correto, e baixo gasto para aquisição. Ele detém limitações, como: baixa energia interna do combustível, eficiência baixa, geração de poluentes para atmosfera, além da necessidade de um depósito para armazenar a lenha (REGUEIRA, 2010).

O fato de o fogão a lenha tradicional possuir baixa eficiência, antigamente nos meios rurais, não era uma preocupação das famílias, devido à fartura de madeira disponível para tal finalidade. Entretanto, com o uso do fogão na cidade, tornou-se uma preocupação o aumento da sua eficiência e conseqüentemente a redução do consumo de madeira, posto que isto reduziria tanto a busca e transporte, como também, o armazenamento de material (SGARBI, 2013).

Além da economia de material, o aumento da eficiência do fogão reduz a emissão de poluentes contidos na fumaça, como monóxido de carbono (CO), fuligem, cinzas e diversos materiais não queimados, que são causadores de doenças respiratórias (SGARBI, 2013). Isto é, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) a fumaça emitida pelo fogão à lenha como o principal fator da causa de morte global de origem ambiental. Em que, respirar a fumaça proveniente de fogões a lenha tradicionais e

lareiras, ocasionou em todo mundo cerca de 2 milhões de mortes prematuras, isto é, em pessoas entre 30 e 70 anos (BETTER BURNING, BETTER BREATHING, 2010).

Da mesma forma, a cocção ineficiente faz com que o cozinheiro (a) fique mais tempo em frente ao fogão e se exponha ao risco da busca e coleta da lenha, ao invés, de estar envolvido em outras atividades, como por exemplo, educacionais (SGARBI, 2013).

Diante disto, este presente estudo tem como finalidade principal aperfeiçoar o fogão a lenha tradicional. Dessa forma, obter maior eficiência e conseqüentemente consumo mínimo de combustível, melhor aproveitamento do calor liberado na queima da lenha para a cocção de alimento e redução dos impactos, ambientais e a saúde, gerados pelo seu uso.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar um fogão a lenha compacto que tenha eficiência superior à de um fogão tradicionalmente construído.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Calcular temperatura adiabática da combustão da lenha com excesso de ar;
- Analisar os processos de convecção/condução/radiação da chama para a panela e fogão;
- Realizar variações das dimensões do fogão para otimização do projeto;
- Selecionar materiais para confecção;
- Proporcionar facilidade de fabricação e transporte;
- Orçar custos dos materiais selecionados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FOGÃO A LENHA TRADICIONAL

Os tipos de fogão a lenha são diversos de acordo a necessidade de adaptação e disponibilidade de materiais para sua construção. Sendo o fogão de três pedras, apresentado na Figura 1, um dos mais antigos confeccionados, o qual tem fabricação mais rudimentar e possui baixíssima eficiência (MORAES *et al.*, 2010). No entanto, mesmo no presente momento, a eficiência energética apresentada por fogões mais usados atualmente, de maneira geral, detém eficiência inferior a 10%.

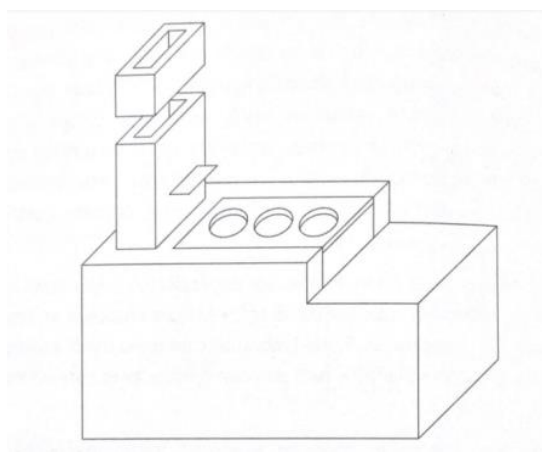
Esse problema deve-se em grande parte pela forma como são construídos e operados (SANGA, 2004). Isto é, tradicionalmente, eles são construídos de alvenaria e tijolos, o qual armazena muita energia térmica, roubando calor da chama. Como também, dispõem de uma chapa de ferro fundido com aberturas circulares colocado logo acima da câmara de combustão, conforme Figura 2, afetam o contato da panela com a chama ser reduzido (MELLO, 2001).

Figura 1 - Fogão três pedras.



Fonte: Alberto Moraes, 2008.

Figura 2 - Fogão a lenha tradicional.



Fonte: Mello, 2001.

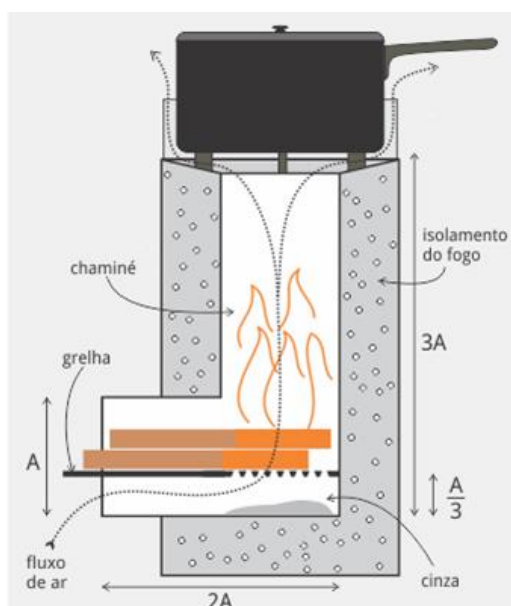
Além desses fatores citados acima, há outros que são incontrolláveis, como o poder calorífico baixo da lenha, a forma como o combustível é introduzido na região de combustão é mais um adicional para a má eficiência. Assim como, a umidade em seu

interior, comprometendo a temperatura de chama e a transferência de calor (MELLO, 2001).

2.2 FOGÕES A LENHA EFICIENTES

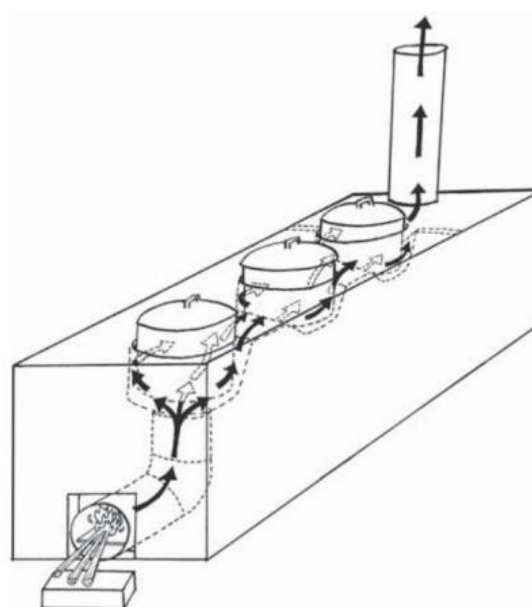
Diversos projetos para aumentar a eficiência dos fogões a lenha vêm sendo estudados em todo o mundo (SANGA, 2004). Dessa forma, surge um modelo de baixa emissão denominado Rocket Stove, mostrado na Figura 3 (MARTINS, 1997). Nele é empregado uma câmara de combustão em “L” com grelha, isolamento em volta do fogo, uma espécie de chaminé, curta e isolada, sobre o fogo, sendo cerca de três vezes mais alta que o seu diâmetro de canal. Como também, apresenta mesmo tamanho da entrada e dos espaços ao redor do forno, isto é, local onde flui o ar quente e a chaminé. Isso fará com que tenha área transversal constante, assim como em outro exemplo apresentado na Figura 4, o que ajuda manter um bom fluxo de ar em todo o fogão (VIEIRA, 2020).

Figura 3 - Estrutura do Fogão Rocket Stove.



Fonte: Adaptado de Setelombas (2020).

Figura 4 - Fogão com área transversal constante.



Fonte: Bryden et al. (2002).

Nesse tipo de fogão a lenha a grelha ajuda o ar a passar por baixo da lenha, isto fará com que o ar seja pré-aquecido antes de chegar ao fogo fazendo atingir uma combustão completa. Já o isolamento ao redor do fogo faz com que reduza a emissão

de fumaça e partículas nocivas, pois trabalha mantendo o fogo quente permitindo que a fumaça entre em contato com a chama e entre em combustão, diminuindo assim as emissões. Assim como, evita a troca de calor com o corpo do fogão ao invés de ser com a panela. No caso da chaminé, ela faz com que eleve a tiragem e contribui para o fogo queimar com mais intensidade (BRYDEN *et al.*, 2002).

Em outro caso, foi realizada por um grupo de pesquisadores a comparação entre o desempenho de um fogão metálico melhorado e um fogão tradicional de lama utilizado na Índia, respectivamente representados na Figura 5 e Figura 6. Em que, foi constatada uma melhora na eficiência térmica para o fogão metálico, ou seja, concluindo que o material metálico favoreceu o desempenho do fogão em relação ao comparado (BAQIR *et al.*, 2019).

Figura 5 - Fogão a lenha de metal melhorado.



Fonte: Baqir et al. (2019).

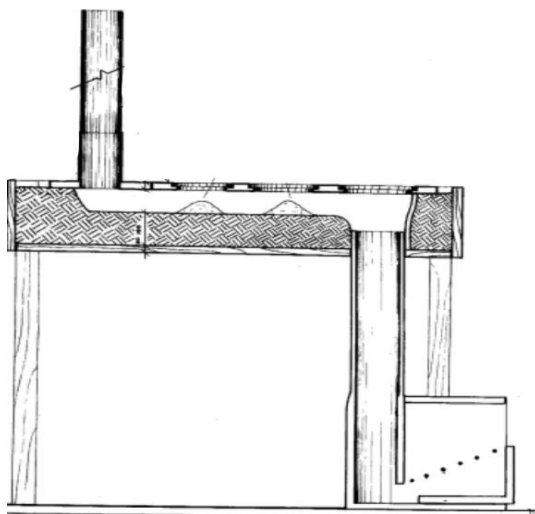
Figura 6 - Fogão tradicional na Índia feito de lama.



Fonte: Baqir et al. (2019).

No Brasil, pesquisadores desenvolveram um fogão chamado de Fogão a Lenha de Queima Limpa (FLQL), apresentado na Figura 7, o qual proporciona uma combustão mais completa e limpa (MARTINS *et al.*, 1992). Onde, através desse fogão, foi possível obter uma redução em cerca de 70% no consumo de lenha em comparação aos fogões tradicionais (SOUZA, 2002). Nele a lenha é introduzida na parte inferior do fogão, próxima ao solo. Ligada ao queimador está a primeira chaminé, a qual é responsável por levar os gases quentes da combustão até as panelas (MARTINS, 1997).

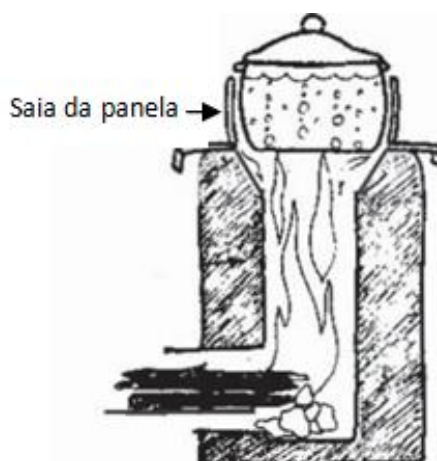
Figura 7 - Estrutura do Fogão FLQL.



Fonte: Adaptado de Martins (1997).

Em 1982 foi criado um elemento importante que melhora a eficiência da transferência de calor para a panela. Esse componente é conhecido como saia, no qual consiste em um cilindro de chapa de metal que é colocado em torno da panela formando um canal estreito, como apresentado na Figura 8. Esse mecanismo força os gases quentes provenientes da combustão a passar, além do fundo, nas laterais da panela de forma rápida (BRYDEN *et al.*, 2002).

Figura 8 - Fogão a lenha com saia da panela.



Fonte: Adaptado de Bryden et al. (2002).

No entanto, a folga necessária na saia deve ser bem definida, posto que se for muito espaçosa os gases quentes não passam seu calor para a panela, e se for muito pequena a tiragem reduz, o que causa um esfriamento do fogo. No qual, para um fogão que produz um fogo de 1,7 quilowatts, com abertura de folga de igual a 6

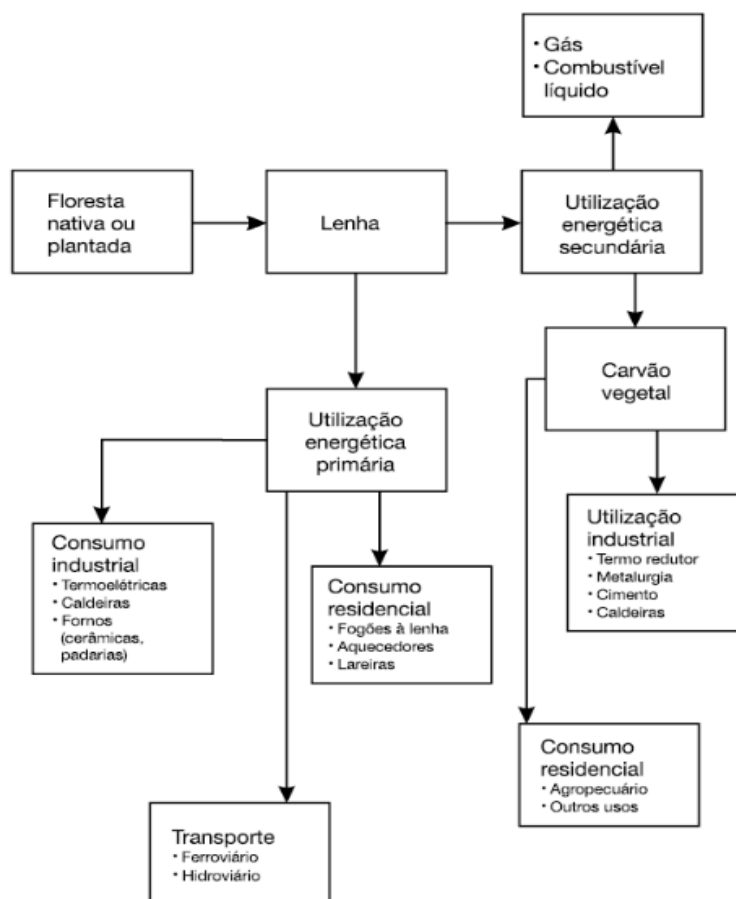
milímetros e a saia fazendo raspar os gases por 15 centímetros da panela terá por volta de 47% de eficiência (BALDWIN, 1987).

2.3 BIOMASSA

Segunda a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a biomassa, do ponto de vista energético, inclui todo recurso renovável de origem vegetal ou animal, o qual é possível ser utilizada como fonte de energia no estado sólido, líquido ou gasoso (VILLELA *et al.*, 2015).

O Brasil possui boas características para a produção da biomassa, como por exemplo, o clima tropical úmido, solo disponível para plantio e a mão de obra rural abundante (MELLO, 2021). Sendo assim, na Figura 9, são apresentados os principais fins da biomassa no nosso país, destacando o consumo residencial, o qual é voltado para uso em fogões a lenha, como já mencionado anteriormente.

Figura 9 - Esquema de uso da biomassa florestal.



Fonte: Dos Santos (2013).

Para obtenção da energia útil contida na biomassa existe uma série de processos de transformação, podendo ser a queima direta, a carbonização, gaseificação ou a hidrólise. Para o caso da lenha, o processo mais comumente utilizado é a queima direta, onde ocorre a secagem, carbonização, gaseificação e a queima do gás em uma câmara de combustão (DOS SANTOS, 2013).

2.3.1 Lenha

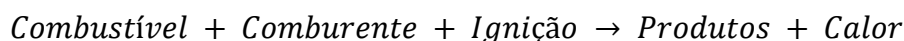
O uso da lenha como biomassa geradora de energia deve-se em grande parte aos aspectos de sua composição química elementar, poder calorífico, teor de umidade e densidade. A madeira possui um poder calorífico em média de 4200 [kcal/kg], de tal forma, que as árvores coníferas tendem a possuir um poder calorífico maior em virtude da resina contida em seu corpo (BRITO, 1979). Sua composição, de forma geral, é $C_6H_{8,7}O_{3,921}N_{0,012}$, o qual possui uma entalpia de formação igual a -738,8 kJ/mol (MEYERRIECKS, 1998).

No tocante ao uso da madeira como combustível, a umidade também é uma propriedade importante, pois a umidade absorve parte do calor do sistema para a evaporação da água. Dados mostram que uma madeira recém cortada pode apresentar umidade de até 25%. Porém, vale ressaltar que a umidade é uma propriedade que depende do clima, da espécie da planta e de como é realizado seu armazenamento pós corte (BRITO, 1979).

Em consideração as propriedades da madeira e o modelo de consumo extrativista, ou seja, custo zero com combustível, viabilizou o uso de fogões tradicionais de baixíssima eficiência, caso contrário, isso não seria possível (DOS SANTOS, 2013).

2.4 COMBUSTÃO

A Combustão é uma reação química exotérmica, a qual, para que ela ocorra, necessita de três componentes: combustível, comburente (oxidante), e uma fonte de ignição. Onde ocorre como resultado desse processo a liberação de energia na forma de calor e produtos de espécies diferentes dos reagentes (RENDEIRO, 2008). Portanto a combustão pode ser representada pela Equação 1.



Em que, o combustível é a substância química capazes de interagir com o comburente e que será oxidado, o comburente é o elemento que oferece oxigênio para o combustível e que irá promover a oxidação, geralmente o ar atmosférico, e os produtos são resíduos da reação (MORAN, 2002).

2.4.1 Combustão com excesso de ar

O ar é composto por vários elementos em diferentes proporções, como apresentado na Tabela 1. Dessa forma, nota-se que ele é responsável por fornecer o oxigênio necessário para que a combustão, no qual, para a combustão completa, existe uma quantidade ideal de ar (MORAN, 2002). Sendo o balanço de massa a referência para se determinar essa quantidade mínima e a reação de oxidação teórica, isto é, a quantidade exata de moléculas de oxigênio necessária para a ocorrência de uma completa oxidação do combustível (BLASELBAUER, 2010).

Tabela 1 - Composição do ar seco.

Componente	Fração Molar (%)
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,93
Dióxido de carbono	0,03
Neônio, hélio, metano e outros	0,01

Fonte: Moran, 2002.

Essa quantidade ideal de ar é também chamada de ar teórico do sistema. Onde a razão ar-combustível, representada pela Equação 2, é ideal (MORAN, 2002).

$$AF = \overline{AF} \left(\frac{M_{ar}}{M_{comb}} \right) = \frac{\text{mols de ar}}{\text{mols de combustível}} \left(\frac{M_{ar}}{M_{comb}} \right) = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_{comb}} \quad 2$$

Onde AF é a razão em base mássica e \overline{AF} é em base molar. Sendo M_{ar} a massa molar do ar e M_{comb} é a massa molar do combustível (MORAN, 2002). Onde, o fluxo de massa de ar (\dot{m}_{ar}) podem ser determinados conforme Equação 3, que relaciona a densidade do ar (ρ), a velocidade (v) e a área (A) (INCROPERA, 2019).

$$\dot{m}_{ar} = \rho v A \quad 3$$

A partir de AF , é possível determinar a quantidade de calor liberada, mostrada na Equação 4, relaciona o fluxo de massa de combustível (\dot{m}_{comb}) e o poder calorífico do mesmo (PCI). Em relação a temperatura da combustão, ela determinados através do balanço térmico, no qual envolve a entalpia (\tilde{h}) e a entalpia de formação (h_f°) dos compostos envolvidos, mostrado pela Equação 5 (BLASELBAUER, 2010).

$$Q = \dot{m}_{comb} PCI \quad 4$$

$$\sum n_s (\overline{h}_f^\circ + \Delta\tilde{h}) = \sum n_e (\overline{h}_f^\circ + \Delta\tilde{h}) \quad 5$$

Em todo tipo de combustão o excesso de ar deve ser trabalhado, pois garante que a quantidade necessária de oxigênio seja atendida e ocorra 100% da oxidação dos hidrocarbonetos. Entretanto, a presença de muito excesso de ar não é desejável, pois reduz a temperatura da chama e transporta energia térmica extra para os produtos, ocorrendo assim a redução da eficiência térmica, além de reduzir o tamanho da chama (CERON, 2010).

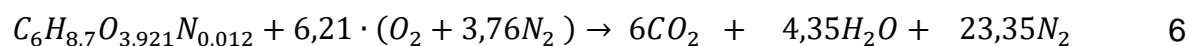
Na prática, em decorrência da falta de controle, esse excesso de ar ultrapassa a marca de 200 a 400%, fazendo com que ocorra a elevação, indesejada, da massa dos gases de combustão. Esse aumento da massa dos gases faz com que ocorra um resfriamento do mesmo, o que exige a queima de uma quantidade adicional de combustível para a manutenção da temperatura do processo (BLASELBAUER, 2010).

2.4.1 Combustão da Lenha

A madeira é considerada um combustível sólido, o qual se apresenta como fonte compacta de armazenamento de energia. Durante seu processo de combustão, isto é, quando submetida a aumento de temperatura, ela passa por degradação térmica, o qual faz com que ocorra liberação de diferentes resíduos (PINTO, 2006).

Essa combustão se faz em quatro estágios distintos: Aquecimento e Secagem, Pirólise, Combustão e Pós-Combustão (RENDEIRO, 2008).

Na primeira fase há o aquecimento e secagem da madeira, onde é retirada a umidade, ou seja, evaporação e eliminação da água. Nesta etapa, é uma energia praticamente perdida. Na segunda fase, pirólise, ocorre a liberação dos gases inflamáveis, os quais, misturados com oxigênio, convertem-se em uma mistura inflamável. O terceiro estágio, denominado de combustão, é onde ocorre a combustão em si, isto é, os gases provenientes da fase anterior reagem com o oxigênio numa reação, como já mencionada, exotérmica, gerando, em uma reação ideal (estequiométrica), o CO_2 , H_2O e calor, como mostrado no Equação 6. Finalmente, no último estágio, a biomassa torna-se uma massa sólida formada de carvão e cinza (RENDEIRO, 2008).



Nessa reação todos os elementos combustíveis presentes no combustível são oxidados. Quando esta condição não é atendida, diz-se que o processo de combustão foi incompleto, ou seja, ocorre a formação de fuligem e fumaça, de CO , hidrocarbonetos e outros gases (MORAN, 2002). Sendo, a eficiência da combustão (η) medida como apresentado na Equação 7.

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{comb}}} \quad 7$$

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é um processo essencial que acontece entre corpos/meios com diferentes temperaturas. Em que, ocorre propagação dessa forma de energia de

um corpo para o outro, isto é, do mais quente para o mais frio. Esse processo chega ao fim só no momento eles entram em equilíbrio térmico (HOLMAN, 2010).

Esse processo pode ser dividido em três principais áreas: condução, convecção e radiação. Sendo esses três os responsáveis pela redistribuição do calor/energia para outros pontos do meio (WELTY, 2017).

2.5.1 Condução

A condução térmica é um processo de transferência de calor devido a uma diferença de temperatura em meio sólido ou em contato entre sólidos, em que não há necessidade da existência de movimento de partículas. Esse tipo de transferência é definido pela lei da condução de Fourier, conforme Equação 8 (ÇENGEL, 2009).

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad 8$$

Posto que, k é a condutividade térmica do material, A a área, (dT/dx) o gradiente de temperatura, concluímos que a taxa de transferência de calor por condução é diretamente proporcional a esses parâmetros (ÇENGEL, 2009). Assim como, o sinal negativo informa que a liberação de energia vai do corpo mais quente para o mais frio (INCROPERA, 2019).

Outro fator de relevância a ser destacado é a condutividade térmica, a qual varia de para cada tipo de material. Essa propriedade indica a disposição que o material tem de transmitir o calor através dele. Como exemplo, para nosso estudo, existem elementos como o metal, que detém alta condutividade térmica, sendo ele ótimo condutor de calor, e temos os isolantes térmicos, os quais possuem baixa condutividade, sendo cruciais para a pouca perda de calor. De forma semelhante, a espessura do material é um ponto fundamental influência na transferência de calor por condução térmica (WELTY, 2017).

2.5.2 Convecção Natural

A convecção natural é uma das formas de transferência de calor, como já mencionado. Esse fenômeno se dá por meio de correntes de convecção que surgem devido a uma variação de massa específica, normalmente influenciada por um gradiente de temperatura, e por uma força de corpo, sendo em grande parte dos casos o campo gravitacional. A combinação dessas duas propriedades da origem a uma força de empuxo, a força motriz da convecção natural (BERGMAN, 2019).

A equação que descrevem o calor liberado pela convecção natural é mostrado na Equação 9 (INCROPERA, 2019). Sendo geralmente, as considerações de regime permanente, escoamento bidimensional, propriedades constantes, fluido incompressível e sob ação de um campo gravitacional são adotadas (BERGMAN, 2019).

$$Q_{conv} = hA\Delta T \quad 9$$

Onde h é o coeficiente de convecção, A é a área da superfície de contato e ΔT é a diferença de temperatura dos campos analisados. Em que, o coeficiente convectivo, para seções tubos circulares, é obtido por meio da Equação 10 (ÇENGEL, 2009).

$$h = \frac{Nu \times k}{D} \quad 10$$

Sendo, Nu o número de Nusselt, k a condutividade térmica e D é o diâmetro. No entanto, o cálculo do diâmetro pode variar a depender do caso analisado, ou seja, para pequenas análises de região anular entre tubos concêntricos o conceito de diâmetro hidráulico (D_h) pode ser usado, como apresentado na Equação 11, no qual é determinado pela área de escoamento (A_h) e pelo perímetro molhado (P) do objeto de avaliação (INCROPERA, 2019).

$$D_h = \frac{4 \times A_h}{P} \quad 11$$

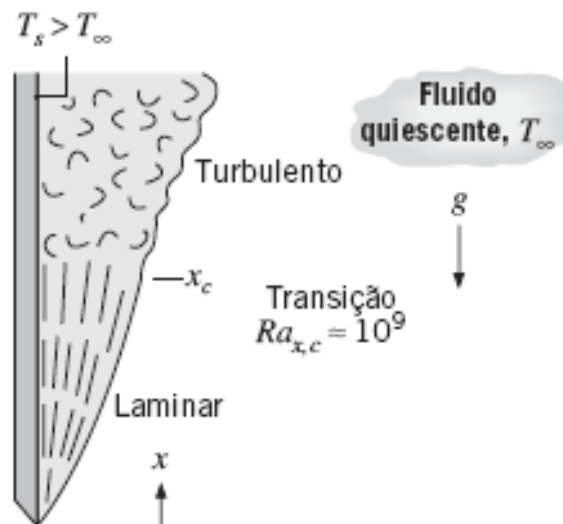
Vale salientar que, para escoamentos externo, as propriedades são obtidas através da temperatura do filme, que é a média entre a temperatura da superfície da geometria e a temperatura do ambiente (WELTY, 2017).

Esse tipo de convecção pode apresentar três categorias de escoamento, que são: laminar, turbulento e de transição (ÇENGEL, 2009). No entanto, para fim de estudos, vamos apenas desenvolver sobre o turbulento.

2.5.2.1 Efeitos Turbulentos

A convecção natural pode apresentar uma camada limite com escoamento turbulento, desde que haja instabilidades fluidodinâmicas suficientes para que a transição de um escoamento laminar para turbulento ocorra. Essa transição, como esquematizada na Figura 10, é influenciada diretamente pelas intensidades das forças de empuxos e pelas forças viscosas no fluido (BERGMAN, 2019).

Figura 10 - Transição de escoamento laminar para escoamento turbulento.



Fonte: Bergman (2019).

Um parâmetro para definir essa transição é obtido pela multiplicação do número de Grashof e Prandtl, em que o primeiro é apresentado pela Equação 12 (ÇENGEL, 2009). O segundo pode ser obtido por meio do Apêndice A - Tabela A.4 do livro Incropera 8ed. Esse produto resultante é denominado como número de Rayleigh. Para placas verticais, valores do número de Rayleigh maiores ou na ordem de 10^9 é considerado escoamento turbulento. Entretanto, uma abordagem analítica pode ser

bastante complexa, recorrendo muitas vezes aos resultados experimentais (WELTY, 2017).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad 12$$

Sendo: g aceleração da gravidade, T_s e T_∞ a temperatura da superfície e do fluido, respectivamente, L o comprimento da geometria, ν a viscosidade cinemática do fluido e por último o β representa o coeficiente de expansão volumétrica, dado pela Equação 13 (ÇENGEL, 2009).

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\rho}{RT^2} = \frac{1}{T} \quad 13$$

2.5.2.1.1 Número de Nusselt

O Número de Nusselt (Nu) surgiu na relação da divisão entre a transferência de calor por convecção pela de condução que ocorre em uma camada de fluido, no qual apresenta uma diferença de temperatura, apresentada. Dessa forma, pode se dizer que: quanto maior o valor de Nusselt, mais eficiente é a convecção dentro da camada (ÇENGEL, 2011).

Para nosso caso analisado, a Equação 14 é o número de Nusselt que melhor representa a convecção dentro de um fogão a lenha (BUSSMANN, 1983).

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 1,03 \cdot Pr^{0,42} \cdot Re_D^{0,5} \quad 14$$

Onde Re_D é o número de Reynolds, no qual relaciona fluxo de massa (\dot{m}), diâmetro da seção circular e a viscosidade do meio (μ). Representado pela Equação 15 (INCROPERA, 2019).

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D\mu} \quad 15$$

2.5.3 Radiação

A transferência de calor por radiação, ao contrário da convecção e da condução, não necessita de um meio de propagação, pode ser transmitida, portanto até no vácuo do espaço. Isto é, ela se torna possível através de ondas magnéticas, em que, a quantidade de energia emitida pelo corpo, sendo ela no estado sólido, líquido ou gasoso, dependerá de sua energia interna. Além disso, a medida que se aumenta a temperatura do corpo, a parcela de transferência de calor por radiação torna-se mais relevante (INCROPERA, 2019).

Para fins de cálculo, a transferência de calor por radiação de uma superfície sólida e um fluido pode ser facilmente obtida pela equação de Stefan-Boltzmann, mostrada na Equação 16 (HOLMAN, 1986).

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad 16$$

Sendo, T_s e T_∞ a temperatura superficial e ambiente, respectivamente, σ a constante de Stefan-Boltzmann, ε a emissividade, A a área superficial (GARCIA *et al.*, 2017)

2.5.4 Resistências Térmicas

Resistência térmica é um assunto de extrema relevância quando citamos transferência de calor, pois a partir dela é possível descrever a capacidade resistiva de um determinado material ao fluxo de calor. Ela é expressa em Kelvin por Watt e se comporta de forma análoga as resistências elétricas. Sendo elas divididas nos três tipos de transferência apresentados nesse estudo, que são: condução, convecção e radiação, para o caso de seções circulares, são mostradas na Equação 17, Equação 18 e Equação 19, respectivamente (HOLMAN, 2010).

$$R_{cond} = \frac{\ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi Hk} \quad 17$$

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi DHh} \quad 18$$

$$R_{rad} = \frac{1}{\sigma \varepsilon A (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)} \quad 19$$

Sendo, D_{ext} e D_{int} os diâmetros externo e interno, respectivamente, H a altura do cilindro, T_1 a temperatura da parede mais quente, T_2 a temperaturas mais fria e A é área superficial. Para efeito de destaque, o ε , que é denominado emissividade, é dependente do material avaliado e o σ , constante de Stefan-Boltzmann, equivale a $5,67 \times 10^{-8}$ (HOLMAN, 2010).

Para o caso da radiação que envolve três corpos, podemos utilizar a Equação 20, a qual envolve a temperatura dos três elementos (T_1, T_2, T_3) e viewfactor (F) (MACCARTY, 2016).

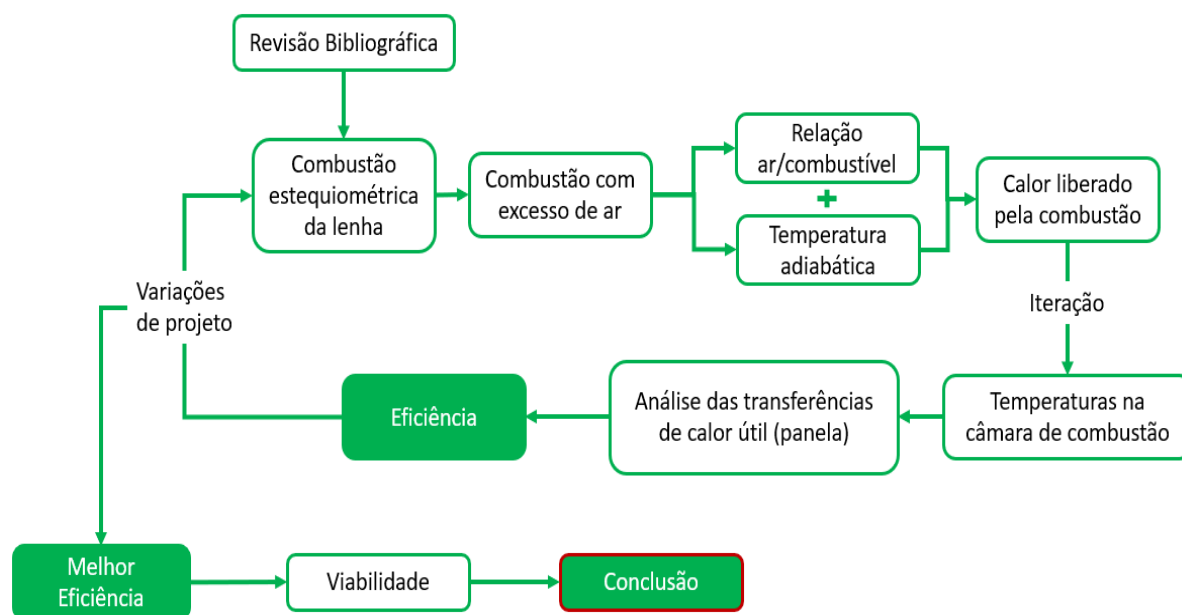
$$R_{rad,3} = \frac{1}{A\sigma\varepsilon F \left(\frac{T_1^4 + T_2^4 - 2T_3^4}{T_1 - T_3} \right)} \quad 20$$

O entendimento da existência resistências térmicas é essencial para a confecção de um projeto e melhoramento de performance de um sistema de transferência de calor, que inclui trocadores de calor, isolamento térmico entre outros elementos que participam de estudos (INCROPERA, 2019).

3. METODOLOGIA

Os passos a serem seguidos para nosso projeto do fogão a lenha são apresentados pela Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma do projeto.



Fonte: Autores (2022).

Para melhor escolha de elementos para nosso projeto foi realizado primeiramente uma análise de fogões a lenha já existentes, o qual foi apresentado no referencial teórico. Dessa forma, foi possível identificar quais pontos são importantes para conseguirmos atingir nosso objetivo.

A partir do nosso estudo, o primeiro passo será a realização do cálculo de combustão estequiométrica da lenha, posto que é necessário para obter o cálculo efetivamente da combustão com excesso de ar. Com isso, encontraremos a nossa relação ar/combustível e a temperatura adiabática do leito da câmara de combustão, os quais serão usados na fase seguinte do nosso estudo.

A segunda etapa será o cálculo do calor liberado por essa combustão, sendo um dos fatores mais importante para determinar a eficiência do nosso projeto. Em seguida, realizaremos uma iteração para determinar as temperaturas no interior e exterior do

fogão, tornando a análise da transferência de calor realizável. Dessa forma, será possível quantificar o calor que chegará na panela, este sendo o outro fator importante para encontrar nossa eficiência.

Com a conclusão de todos os cálculos de transferência de calor para a panela, realizaremos a variação das dimensões do nosso projeto, possibilitando uma análise mais eficaz do comportamento da eficiência. Dessa maneira, seremos capazes de determinar a estruturação ótima para nosso fogão a lenha.

A última fase, e de grande relevância, será o cálculo de viabilidade do projeto, isto é, orçar custo dos materiais escolhidos e chegar na conclusão da efetividade do projeto. É necessário salientar que todos os cálculos serão realizados no Excel do pacote Office versão 2019, assim como, as iterações ocorrerão na extensão Solver do mesmo. Como também, para otimizar a geração de gráficos, será utilizado uma automatização dos cálculos da eficiência no próprio Excel.

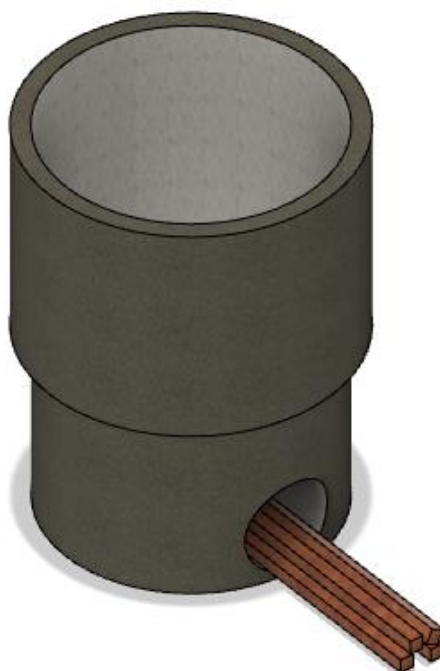
Da mesma forma, para realização dos desenhos 3D e 2D será utilizando o Fusion 360® da AutoDesk versão estudantil 2023 e o AutoCad® da AutoDesk versão estudantil 2021, respectivamente. Com isso, concluindo nosso projeto para apresentação dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELO DO FOGÃO

Para apresentação dos resultados obtidos, deve-se, primeiramente, demonstrar qual o design adotado para nosso fogão a lenha. Conforme Figura 12, nosso projeto tem como ideia, a partir dos estudos realizados na revisão bibliográfica, a adoção de um formato cilíndrico e com diâmetro constante em todo seu percurso até a boca, que fica em contato com a panela.

Figura 12 - Design do fogão projetado.



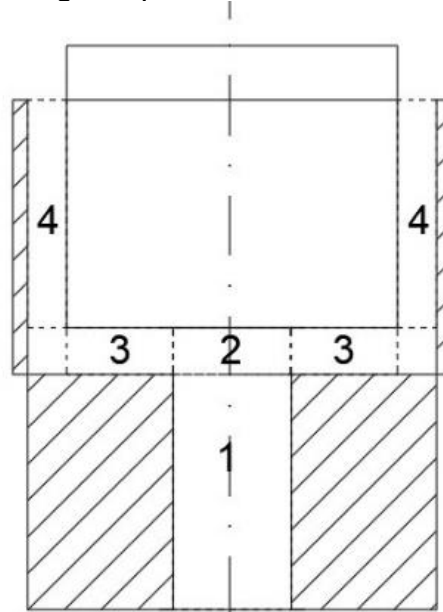
Fonte: Autores (2023).

Da mesma forma, ele tem a presença de isolante térmico em toda sua extensão. Como também, a utilização da saia, que como mostrado anteriormente, contribui com melhor aproveitamento dos gases que seriam perdidos.

4.2 FORMA DE ANÁLISE

Para nosso estudo, foi adotado a distribuição por regiões, conforme Figura 13, a fim de tornar os cálculos mais precisos, onde cada região tem influência sobre a outra.

Figura 13 - Distribuição das regiões para análise.



Fonte: Autores (2023).

Em outras palavras, a temperatura de saída de cada região é considerada a temperatura de entrada da sua subsequente, sendo possível através da utilização da lei de conservação de energia, apresentada na Equação 21 (ÇENGEL, 2011).

$$Q = \sum \dot{m} (\tilde{h}_{entrada} - \tilde{h}_{saida}) \quad 21$$

É possível identificar que a região 1 é a associação do local onde ocorre a combustão, que chamamos de leito, com a câmara de combustão. A região 2 é a ligação dos gases liberados pela 1 com a panela. A terceira (3) e a quarta (4) não dispõem de contato com a câmara de combustão, no entanto, são consequências dos calores liberados pela região 2, sendo a região 4 é resultante da adição da saia.

Por conseguinte, adequado ao modelo do nosso projeto, temos a demonstração, na Tabela 2, de como foram realizadas as análises. Bem como, na Tabela 3 são apresentados os valores atribuídos para o estudo.

Tabela 2 - Equações para o cálculo da eficiência.

Equação	Encontrado
$C_6H_{8,7}O_{3,921}N_{0,012} + 1,30 \cdot 6,21 \cdot (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow 6CO_2 + 4,35H_2O + 30,36N_2 + 1,86O_2$	T_L AF
$\dot{m}_{ar} = \rho v A$	\dot{m}_{ar}
$\dot{m}_{comb} = AF / \dot{m}_{ar}$	\dot{m}_{comb}
$Q_{comb} = \dot{m}_{comb} PCI$	Q_{comb}
$Q_{R1} = \phi_{gases} Q_{rad,parede-panela} + \phi_{chama} Q_{rad,leito-parede} + Q_{parede,R1}$	$T_{sai,R1} = T_{ent,R2}$ $Q_{R1,Panela}$
$Q_{R2} = Q_{conv,R1(sai)-panela}$	$T_{sai,R2} = T_{ent,R3}$ $Q_{R2} = Q_{R2,Panela}$
$Q_{R3,Panela} = Q_{conv,R2(sai)-panela}$	$T_{sai,R3}$ $= T_{ent,R4}$
$Q_{R4,Panela} = Q_{conv,R3(sai)-panela} + \phi_{gases} Q_{rad,parede-panela}$	$Q_{Total, Panela}$
$Q_{Total, Panela} = Q_{R1,Panela} + Q_{R2,Panela} + Q_{R3,Panela} + Q_{R4,Panela}$	$\eta(\%)$

Fonte: Autores (2023).

Tabela 3 – Valores iniciais para o cálculo.

Propriedade	Valor	Unidade	Referências
Emissividade do carvão	0,7000	-	(MACCARTY; BRYDEN, 2016)
Emissividade da parede externa	0,9000	-	(VÓTEX EQUIPAMENTOS)
Condutividade do isolante	0,0450	W/m.K	(ABNT, 2003)
Emissividade da parede interna	0,4000	-	(VÓTEX EQUIPAMENTOS)
Diâmetro interno da saia	0,3032	m	-
Espessura do isolante da saia	0,0200	m	-
Espessura do isolante no fogão	0,1016	m	-
Altura da panela	0,2400	m	-
Diâmetro da panela	0,2800	m	-

Fonte: Autores (2023).

4.2.1 Método Iterativa Região 1

É necessário destacar que para a região 1 foi realizado cálculo iterativo, no qual tinha como variáveis as temperaturas da parede interna, externa e o calor perdido para a parede. Este último, dependente das resistências térmicas da transferência de calor da região 1 com o ambiente. Dessa forma, o cálculo iterativo foi com base nas igualdades da Equação 22.

$$Q_{parede,R1} = \frac{T_{chama} - T_{ambiente}}{R_{interna} + R_{condução} + R_{externa}} = \frac{T_{chama} - T_{interna}}{R_{interno}} = \frac{T_{externa} - T_{ambiente}}{R_{externo}} \quad 22$$

No qual, as resistências térmicas $R_{interna}$ e $R_{externa}$ são representadas na Equação 23 e Equação 24, respectivamente.

$$R_{interna} = (R_{interna,convecção} + R_{interna,radiação})_{chama-parede} \quad 23$$

$$R_{externa} = (R_{externa,convecção} + R_{externa,radiação})_{parede-ambiente} \quad 24$$

4.2.2 Considerações adotadas

Durante os cálculos, algumas considerações foram adotadas, a fim de tornar, dentro da nossa realidade, nosso estudo mais preciso. Conforme mostrado abaixo:

Considerações gerais:

- Estado Estacionário;
- Temperatura Ambiente como 298 [K];
- Temperatura na panela constante e igual a 373 [K];
- Gravidade: $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$;
- Temperatura uniforme na direção radial;
- Desconsiderar transferência de calor por condução nas paredes do fogão (paredes muito finas em relação ao isolante);
- Velocidade de escoamento dos gases no interior do fogão constante e igual a $1,5 \text{ [m/s]}$ (MACCARTY; BRYDEN, 2016);
- Temperatura da Chama 61% da Temperatura Adiabática (MACCARTY; BRYDEN, 2016);

Propriedades do ar para os gases de combustão (MACCARTY; BRYDEN, 2016):

- $k = -2 \cdot 10^{-8}T^2 + 8 \cdot 10^{-5}T + 0,0033 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
- $\rho = \frac{353,09}{T} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- $cp = 0,145T + 984,49 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
- $\mu = -7 \cdot 10^{-12}T^2 + 4 \cdot 10^{-8}T + 8 \cdot 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$

Propriedades de convecção:

- A convecção livre externa ao tubo corresponde à de uma placa vertical, conforme Equação (SHAH; DATE, 2011):

$$h_{externa,parede} = 1,42 \left(\frac{T_{externa} - T_{ambiente}}{H_{fogão}} \right)^{0,25}$$

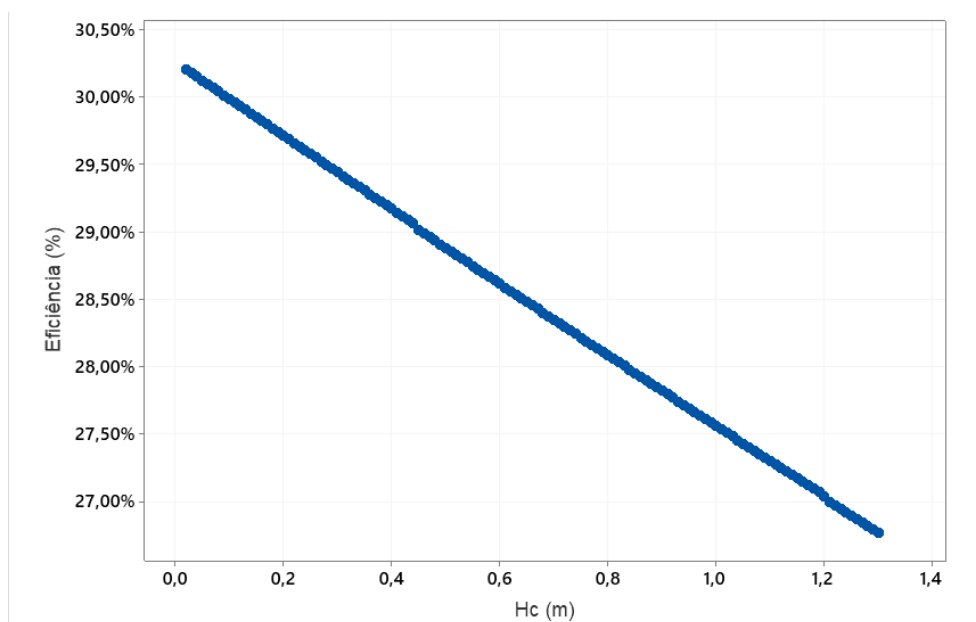
Propriedades da radiação:

- A radiação é modelada assumindo a radiação de um corpo negro entre meios não participantes (MACCARTY; BRYDEN, 2015);
- Para o cálculo do fator de forma F: assume-se o fundo da panela e o fundo do leito de combustível discos de mesmo diâmetro (MACCARTY; BRYDEN, 2015);
- Fator de ajuste = 0,2 (MACCARTY; BRYDEN, 2016);

4.3 ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

Antes de analisarmos os gráficos encontrados pela variação dos parâmetros, devemos destacar que o valor do diâmetro da câmara de combustão possui uma limitação, isto é, seu tamanho não pode ser maior que o diâmetro da panela, posto que a panela não estará suspensa e sim apoiada na extremidade superior do fogão. Dessa forma, consideramos o limite de uma diferença de 0,025 metros de folga em relação ao tamanho da panela.

Gráfico 1 - Eficiência com variação da altura da câmara de combustão ($D_c=0,1\text{m}$).



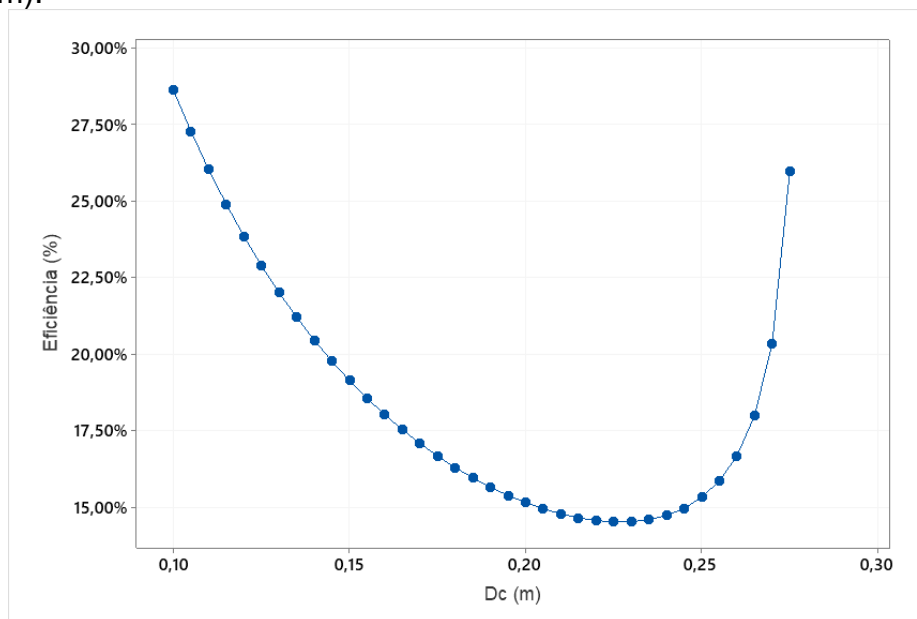
Fonte: Autores (2023).

Conforme o Gráfico 1, podemos concluir que a correlação da eficiência do fogão com a altura da câmara de combustão. O resultado obtido foi que a eficiência decresce com o aumento de H_c . Esta queda ocorre, pois, quanto maior a altura H_c , maior o deslocamento dos gases até o fundo da panela, ou seja, aumentando assim as perdas de calor para a parede e conseqüentemente os gases chegam com temperatura menor.

No entanto, esta modelagem não leva em consideração a distância mínima necessária para que os voláteis sejam queimados (BUSSMANN, 1983).

Analisando o Gráfico 2 foi possível notar que até um determinado valor a eficiência do fogão decai com o aumento do diâmetro da câmara de combustão. No entanto, a partir de um momento, a eficiência volta a subir de forma mais abrupta.

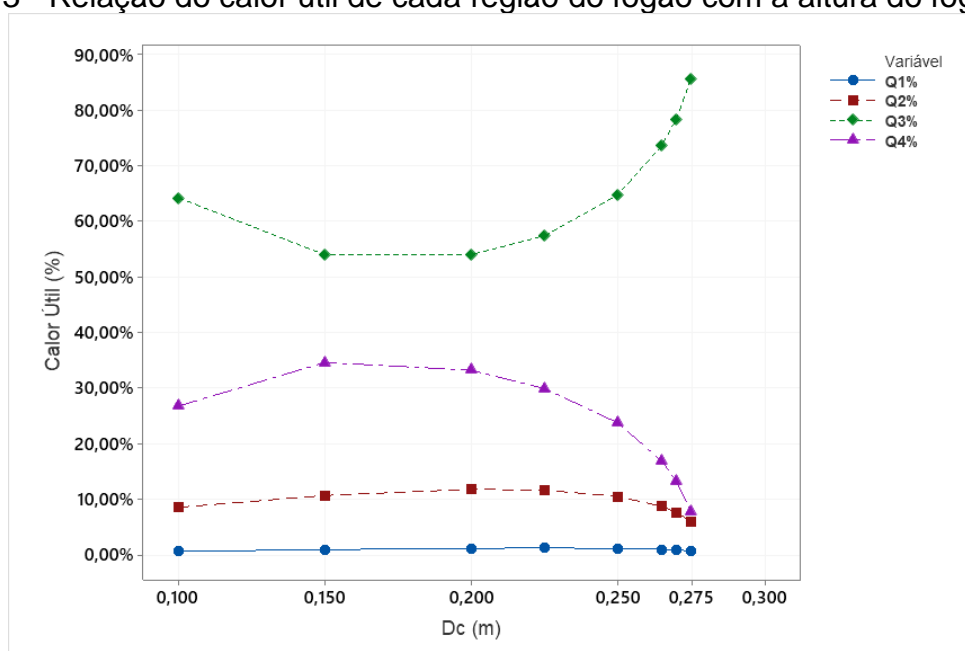
Gráfico 2 - Análise de eficiência com variação do diâmetro da câmara de combustão ($H_c = 0,2m$).



Fonte: Autores (2023).

Então, chegamos à conclusão de que o aumento do diâmetro influencia positivamente com a região 3 (R3), a qual se torna a maior responsável pelo calor que é transmitido para a panela, assim como mostrado no Gráfico 3. Onde, sua maior influência é em decorrência do seu coeficiente de transferência de calor por convecção subir muito em relação ao inicial.

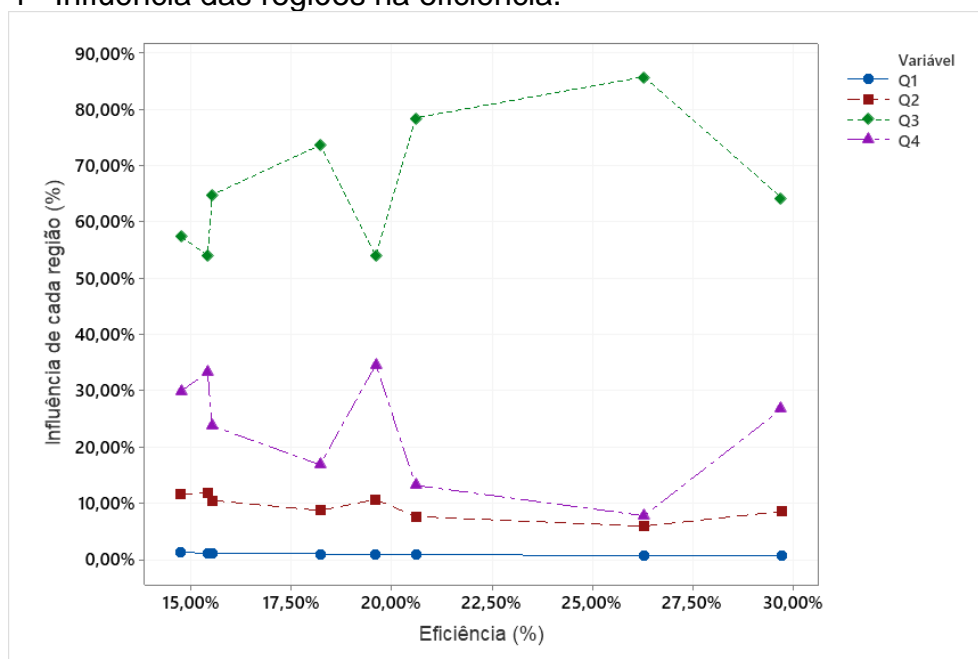
Gráfico 3 - Relação do calor útil de cada região do fogão com a altura do fogão.



Fonte: Autores (2023).

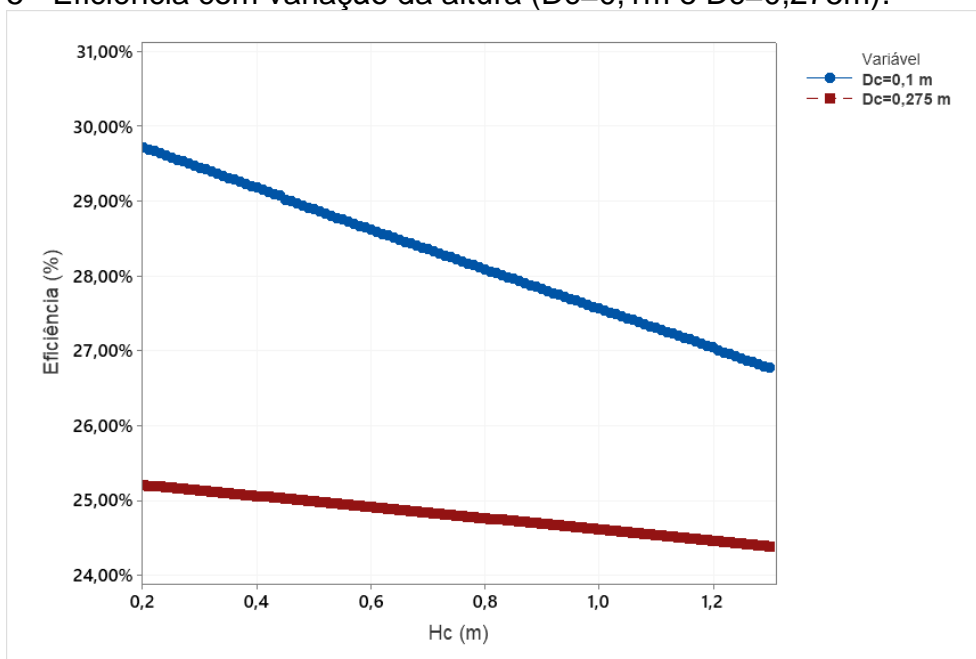
No entanto, analisando o Gráfico 4, é evidente que no ponto de maior diâmetro D_c que é influenciada principalmente pela região 3 não é necessariamente a maior eficiência entregue pelo projeto. Dessa forma, para determinar um diâmetro e altura ótimos, devemos também analisar o custo de confecção do projeto.

Gráfico 4 - Influência das regiões na eficiência.



Fonte: Autores (2023).

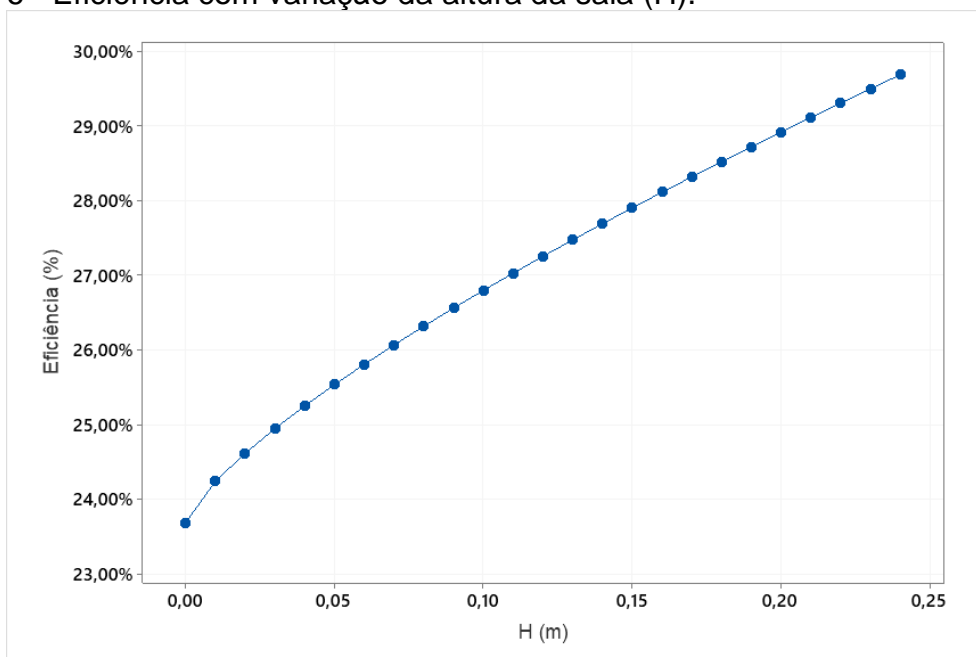
Contudo, analisando apenas a eficiência, os valores que apresentam mais coerência para serem escolhidos seria os dois valores extremos, ou seja, 0,1 metros e 0,275 metros. Com isso, esses valores foram escolhidos para uma análise seguinte, Gráfico 4, o qual foi fixado os dois valores de diâmetro e variado a altura.

Gráfico 5 - Eficiência com variação da altura ($D_c=0,1\text{m}$ e $D_c=0,275\text{m}$).

Fonte: Autores (2023).

Assim, de acordo com o Gráfico 5 podemos notar que para o caso do diâmetro de combustão igual a 0,275 metros a eficiência reduz menos, com o aumento da altura do fogão, do que comparado com o do diâmetro de 0,1 m. No entanto, a eficiência entregue pelo segundo caso, 0,1m, é maior.

Gráfico 6 - Eficiência com variação da altura da saia (H).



Fonte: Autores (2023).

No Gráfico 6 foi possível notar a contribuição da saia para o aumento da eficiência do projeto. Em que, quando há a ausência da saia, isto é, altura (H) igual a zero, o fogão apresenta uma eficiência de 24%, a medida que a altura da saia aumenta sua eficiência também aumenta.

Esse resultado já era esperado, uma vez que, a saia mantém os gases quentes que saem da câmara de combustão em contato com as paredes laterais da panela fazem ocorrer otimização da troca de calor por convecção para a panela. Além disso, a saia exerce um papel importante que é de bloquear a entrada do ar frio do ambiente com os gases que estão de baixo da panela.

A partir do Gráfico 3 e Gráfico 5, determinamos que o diâmetro da câmara de combustão (D_c) e a altura (H_c) melhor aplicada será a de 0,1 metros e 0,2 metros, respectivamente. Dessa forma, as dimensões finais do nosso projeto são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões finais de projeto encontradas.

Dimensões Finais [m]	
Diâmetro da Câmara de Combustão	0,100
Diâmetro Externo do Fogão	0,3032
Altura da Câmara	0,200
Altura da Saia	0,240

Fonte: Autores (2023).

Da mesma forma, na Tabela 5, é apresentado os dados com os valores calculados para se obter essas dimensões apresentadas na tabela cima.

Tabela 5 - Valores das propriedades usadas na dimensão do projeto escolhido.

Valores das Propriedades	
Vazão de ar [kg/s]	0,00204
Calor liberado pela combustão [W]	3668
Calor Útil (Panela) [W]	1087,55
Temperatura Adiabática [K]	1996
Temperatura Externa do fogão [K]	319
Temperatura Interna do fogão [K]	1172
Eficiência	29,65%

Fonte: Autores (2023).

Uma observação que podemos fazer é referente a variação do tipo de isolante, como visto na Tabela 6, a condutividade e preço dos três tipos de isolantes mais comuns não variam significativamente para que possa ser realizado uma análise de melhor custo benéfico.

Tabela 6 - Condutividade e preço de isolantes.

Material Isolante Térmico	K[W/m.K]	Faixa de Preço/m ²	Referências
Lã de Rocha	0,045	18,25	PORTAL DA ACUSTICA
Lã de Vidro	0,045	15 a 25	DOCE OBRA
Espuma Rígida de Poliuretano	0,03	18 a 30	CRONOSHARE

Fonte: Autores (2023).

Dessa forma, a lã de rocha foi escolhida para a confecção desse projeto, posto que um dos principais objetos desse estudo é sua eficiência e custo.

4.4 CUSTO

Para o cálculo do custo de produção foi considerado apenas os custos com os materiais essenciais, aço inox 0,5 mm e lã de rocha, para a elaboração do fogão a lenha projetado, sem levar em conta o custo com mão de obra. Sendo, a escolha do aço inox proporciona maior durabilidade do fogão. Outra alternativa seria o aço

galvanizado, no entanto, apesar de ter menor custo, no processo de conformação, que seria necessário ocorrer na fabricação do projeto, fissuras surgiriam em sua estrutura, assim, afetando sua propriedade.

Abaixo, na Tabela 7, estão os preços considerados para o cálculo dos custos com materiais que foi obtido através de uma pesquisa de faixa de preço com os vendedores via web.

Tabela 7 - Custo de material.

Material	Preço/m ²	Referências
Chapa de aço de espessura 0,50 mm	R\$ 330,00	MERCADO LIVRE
Lã de Rocha 0,50 mm	R\$ 97,22	QUANTO CUSTA

Fonte: Autores (2023).

A partir dos dados apresentados, chegamos no custo total de R\$ 403,57 para a fabricação do fogão.

5. CONCLUSÃO

Ao final do estudo, podemos concluir que os nossos objetivos foram atingidos, posto que, apesar da eficiência gerada não ser a que esperávamos, alcançamos 29,65% de eficiência, um valor maior que três vezes o tradicionalmente construído. Assim como, nosso projeto tornou possível a facilidade no deslocamento e fabricação.

No que se refere a custo, nosso fogão possui um valor acima da média de mercado, quando comparado a fogões similares. No entanto, como não era o foco do nosso estudo a economia do combustível, não avaliamos o quanto estamos ganhando em relação aos outros já desenvolvidos, em relação ao consumo de combustível, para analisar se o custo para fabricação é compensado com a economia de lenha. Desse modo, esse tema pode ser tratado em estudos futuros, levando também em consideração alterações no tipo do combustível empregado na queima, como exemplo, o uso do carvão.

Para se obter um resultado com maior certeza da eficiência do seu projeto, a sua construção é de grande valia. Dessa forma, a construção de um modelo físico deve ser levado em consideração para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABNT. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica , da capacidade térmica , do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 1–21, 2003

Baldwin S. 1987. **Biomass Stoves: Engineering Design, Development and Dissemination**. Mt Rainier. Disponível em: <http://www.newdawnengineering.com/website/library/Papers+Articles/Biomass%20Stoves,%20Engineering%20Design,%20Development%20and%20Dissemination,%20Samuel%20Baldwin%201987.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022.

BAQIR, M. *et al.* Assessment of an energy-efficient metal chulha for solid biomass fuel and evaluation of its performance. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 16, n. 11, p. 6773–6784, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2028-9>.

BERGMAN, Theodore L. Incropera - **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Grupo GEN, 2019. 9788521636656. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636656/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

BETTER BURNING, BETTER BREATHING. [S.L.]: Environmental Health Perspectives: **Improving Health with Cleaner Cook Stoves**, v. 118, n. 3, mar. 2010. Mensal.

BLASELBAUER, H. Combustão de madeira e controle de poluição em cerâmicas. Lippel, 2010. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-50combustao-de-madeira-e-controle-de-poluicao-em-ceramicas.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2022.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L.E.G., **Usos diretos e propriedades para geração de energia**. IPEF: Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras, circular técnica nº52. 1979.

BRYDEN *et al.* **Design Principles for Wood Burning Cook Stoves**. [S. l.], 1 set. 2002. Disponível em: <http://www.bioenergylists.org/stovesdoc/Pcia/Design%20Principles%20for%20Wood%20Burning%20Cookstoves.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2022.

BUSSMANN, P. J.T.; VISSER, P.; PRASAD, K. Krishna. Open fires: Experiments and theory. **Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–34, 1983.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Grupo A, 2009. 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551280/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

CERON, L. P. Controle do excesso de ar em processos de combustão. Meio Filtrante, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Luciano-Peske-Ceron/publication/281716804_Controlo_do_excesso_de_ar_em_processos_de_combustao/links/55f60eab08ae6a34f66325d1/Controlo-do-excesso-de-ar-em-processos-de-combustao.pdf. Acesso em: 30 jul. 2022.

CRONOSHARE. **Quanto custa o poliuretano pulverizado?**. Disponível em: <https://www.cronoshare.com.br/quanto-custa/poliuretano-pulverizado>. Acesso em: 2 jul. 2023.

DOCE OBRA. **Lã de Vidro: O que é? Usos, vantagens, preço e tudo sobre!**. Disponível em: <https://casaconstrucao.org/materiais/la-de-vidro/#:~:text=Quanto%20custa%3F%20O%20pre%C3%A7o%20da%20l%C3%A3%20de%20vidro,metro%20quadrado%20custa%20de%2015%20a%2025%20reais..> Acesso em: 2 jul. 2023.

DOS SANTOS, Marco Aurélio. **Fontes de Energia Nova e Renovável**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2013. 978-85-216-2474-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2474-5/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

EPE. Balanço Energético Nacional 2022. 2022. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 23 ago. 2022.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2013. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2022>. Acesso em: 23 de julho de 2022.

FERREIRA, André Sousa. **Design de fogões industriais a lenha para países em vias de desenvolvimento: o caso da empresa Gamadaric**. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design Integrado, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, 2017.

GARCIA, R. L. *et al.* Resfriamento de um cilindro de aço: Estudo experimental da convecção e radiação do calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 39, n. 4, 2017.

GIODA, Adriana. Características e procedência da lenha usada na cocção no Brasil. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 33, n. 95, p. 133-150, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3395.0009>.

J.P., Holman. **J.P.Holman**. [S. l.: s. n.], 1986.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor - Tradução da 7ª edição norte-americana**. [Digite o Local da Editora]: Cengage Learning Brasil, 2015. 9788522122028. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522122028/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

MACCARTY, Nordica A.; BRYDEN, Kenneth M. A generalized heat-transfer model for shielded-fire household cookstoves. **Energy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 33, p. 96–107, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2016.03.003>.

MACCARTY, Nordica A.; BRYDEN, Kenneth M. Modeling of household biomass cookstoves: A review. **Energy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 26, p. 1–13, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.02.001>.

MARTINS, G.; Barros, I. F. R.; Lima, M. D. Design Social Vs Novas Tecnologias. Anais do Workshop Internacional Renovação Tecnológica, Curitiba, PR, 1992.

MARTINS. **Fogão a Lenha de Combustão Limpa**. [S. l.], 1 jan. 1997. Disponível em:

http://www.portaldoeletrodomestico.com.br/downloads/fogao_a_lenha/Fogao_a_lenha_limpa.pdf. Acesso em: 27 jul. 2022.

MELLO, M. G. (org.). **Biomassa, Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001.

MERCADO LIVRE. **Chapa Aço Inox 430 Escovado 1000x500mm Na Esp. De 0,5mm**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1001608657-chapa-aco-inox-430-escovado-1000x500mm-na-esp-de-05mm-_JM#position=4&search_layout=stack&type=item&tracking_id=dfded928-fdc7-4bd3-b4e6-7c7b16af9b0f. Acesso em: 2 jul. 2023.

MEYERRIECKS, Will. 99/03735 Organic fuels: composition and formation enthalpy. Part I—wood derivatives, related carbohydrates, exudates and rosin. **Fuel and Energy Abstracts**, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 393, 1999.

MORAES , ALBEMERC *et al.* **O USO DO FOGÃO A LENHA NO SEMI-ÁRIDO PIAUIENSE: UM ESTUDO DE CASO**. [S. l.], 1 jan. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Albemerg-Moraes-2/publication/351424267_O_USO_DO_FOGAO_A_LENHA_NO_SEMI-ARIDO_PIAUIENSE_UM_ESTUDO_DE_CASO/links/6096a28c299bf1ad8d892976/O-USO-DO-FOGAO-A-LENHA-NO-SEMI-ARIDO-PIAUIENSE-UM-ESTUDO-DE-CASO.pdf. Acesso em: 27 jul. 2022.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

PINTO, E. M., CALIL JUNIOR, C. **Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo**. Revista Minerva, São Carlos - SP, v. 3, n. 2, p. 131-140, 2006.

PORTAL DA ACUSTICA. **Placa Lã de Rocha 1200 x 600 x 51mm - 64kg/m³ - 6 Unidades**. Disponível em: https://www.portaldaacustica.com/produto/placa-la-de-rocha-1200-x-600-x-51mm-64kg-m-6-unidades-70145?utm_source=&utm_medium=&utm_campaign=&gclid=Cj0KCQjwnf-kBhCnARIsAFIq491mJKwUXWNIC4k4xhJqoszGQEwXITERGpM451Vgmiozc0maoJWST-MaAkVnEALw_wcB. Acesso em: 2 jul. 2023.

QUANTO CUSTA. **Quanto custa Lã de rocha?**. Disponível em: <https://www.precootimo.com.br/la-de-rocha-preco/#:~:text=Na%20Leroy%20Merlin%2C%20um%20rolo%20que%20tem%204%2C8,que%20t%C3%AAm%204%2C32%20metros%20quadrados%20ficam%20R%24%2096%2C00..> Acesso em: 2 jul. 2023.

REGUEIRA, T. M. **Comparação entre a eficiência de dois modelos de fogão a lenha e seus impactos sobre ao desmatamento da caatinga**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Ciências Ambientais, Recife, 2010. 26p.

RENDEIRO, Gonçalo. et al. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição. Brasília: Ideorama Design e Comunicação Ltda., 2008.

SANGA, G. A. **Avaliação de impactos de tecnologias limpas e substituição de combustíveis para cocção em residências urbanas na Tanzânia**. UEC. 2004.

SGARBI, Felipe de Albuquerque. **Disseminação de fogões a lenha eficientes: uma política necessária para a promoção de serviços energ**. Recife: Instituto de Energia e Ambiente - Usp, 2013. 22 slides, color.

SHAH, Rahul; DATE, A. W. Steady-state thermochemical model of a wood-burning cook-stove. **Combustion Science and Technology**, [s. l.], v. 183, n. 4, p. 321–346, 2011.

SOUZA, Rubem Cesar Rodrigues, PEREIRA, Gilmara de Araújo, FRANCA, Breno de Souza *et al.* **Aperfeiçoamento e difusão de fogão a lenha de queima limpa no estado do Amazonas**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. Proceedings online. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200038&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 23 Jul. 2022.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da termodinâmica. 6ª Edição. Michigan: Edgard Blucher Ltda, 2003.

VIEIRA, I. **Rocket Stove: Princípios de Design**. setelombas, 2020. Disponível em: <https://www.setelombas.com.br/2020/05/10-principios-de-design-de-fogao-a-lenha/>. Acesso em: 28 jul. de 2022.

VILLELA, Alberto *et al.* **O uso de energia de biomassa no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2015. 198 p. v. 4. ISBN 9788571933637.

VÓTEX EQUIPAMENTOS. **Emissividade**. Disponível em: <https://www.vortex.com.br/raytek/emissividade.html>. Acesso em: 2 jul. 2023.

W. H. McAdams, Heat Transmission, 3. ed. Capítulo 7, McGraw-Hill Book Company, Nova York, 1957.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa, 6ª edição**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2017. 9788521634201. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>. Acesso em: 30 jul. 2022.