

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DA NATUREZA E DE TECNOLOGIA – CENT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLOS HENRIQUE MEDINA GUEDES

**AVALIAÇÃO DOS GASES GERADOS NA COMBUSTÃO DE BIOMASSA UTILIZANDO
FORNOS A COMBUSTÃO SIMPLES E A COMBUSTÃO TRIPLA**

BENTO GONÇALVES

2022

CARLOS HENRIQUE MEDINA GUEDES

**AVALIAÇÃO DOS GASES GERADOS NA COMBUSTÃO DE BIOMASSA UTILIZANDO
FORNOS A COMBUSTÃO SIMPLES E A COMBUSTÃO TRIPLA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Matheus Poletto.

BENTO GONÇALVES

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, Juarez e Raquel, que fizeram tudo o possível para que eu realizasse minha graduação da forma que posso agregar em meu futuro como profissional, minha avó paterna Vicentina, que durante sua vida esteve presente ao meu lado. Aos docentes que sempre que possível trocávamos ideias durante a graduação agregando em meu conhecimento pessoal.

RESUMO

Atualmente tem crescido a busca por fontes energéticas alternativas, tanto para aquecimento residencial ou mesmo para preparo de alimentos. A força motriz para essa busca é impulsionada por redução de custos e questões ambientais, onde algumas empresas além de desenvolver novos produtos também buscam melhorar os já existentes, para que se possa aproveitar ao máximo as demandas energéticas. Assim, o presente estudo fez uma análise comparativa de um sistema tripla queima e de um sistema de queima simples utilizados em fogões à lenha residenciais, para que fossem analisados parâmetros de emissões de gases entre os produtos distintos. Foram determinados os teores de CO e CO₂, compostos orgânicos voláteis totais e formaldeído, além da temperatura e umidade dos gases expelidos na saída da chaminé para cada sistema avaliado utilizando as madeira de pinus e eucalipto. As medições foram realizadas em quintuplicata na saída de cada chaminé utilizando medidores portáteis de qualidade do ar. De maneira geral, os resultados obtidos demonstraram que a temperatura dos gases emitidos pela chaminé do sistema de combustão simples é maior que aquela dos gases gerados pelo sistema de tripla queima. Por outro lado, a umidade dos gases gerados no sistema de queima tripla é maior que a observada no sistema de queima simples. Ocorreu uma redução nas emissões de CO de 102% com a madeira de pinus e 240% utilizando a madeira de eucalipto no sistema de tripla queima comparado com o de queima simples, porém as medidas também demonstram teores mais elevados de CO₂, possivelmente em virtude de um processo mais efetivo de queima do carbono no sistema de tripla queima. Os teores de compostos orgânicos voláteis totais e formaldeído se mostraram superiores no sistema de tripla queima quando comparado ao sistema de queima simples em relação às duas espécies de madeira utilizadas. Com base nos resultados obtidos neste estudo, o sistema de tripla queima utilizado no fogão à lenha avaliado é mais efetivo que o sistema de queima simples o que possivelmente contribui para um maior aproveitamento energético da madeira, além de reduzir consideravelmente a emissão de CO o que contribui reduzir à problemática ambiental associada a queima de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: tripla queima, queima simples, combustão, biomassa, fornos a lenha.

ABSTRACT

Currently the search for alternative energy sources has grown, both for residential heating or even for food preparation. The driving force for this search is driven by cost reduction and environmental issues, where some companies besides developing new products also seek to improve existing ones, so that one can make the most of the energy demands. Thus, the present study made a comparative analysis of a triple-burning system and a simple burning system used in residential wood-burning stoves, in order to analyze the gas emission parameters between the different products. The contents of CO and CO₂, total volatile organic compounds and formaldehyde were determined, as well as the temperature and humidity of the gases expelled at the chimney exit for each system evaluated using pine and eucalyptus wood. The measurements were performed in quintuplicate at the exit of each chimney using portable air quality meters. In general, the results obtained showed that the temperature of the gases emitted by the chimney of the simple combustion system is higher than that of the gases generated by the triple burning system. On the other hand, the humidity of the gases generated in the triple-burner system is higher than that observed in the simple-burner system. There was a reduction in CO emissions of 102% with pine wood and 240% using eucalyptus wood in the triple firing system compared to the simple firing system, but the measurements also show higher CO₂ contents, possibly due to a more effective carbon burning process in the triple firing system. The contents of total volatile organic compounds and formaldehyde were slightly higher in the triple firing system when compared to the single firing system for both wood species used. Based on the results obtained in this study, the triple firing system used in the evaluated wood stove is more effective than the simple firing system, which possibly contributes to a better use of wood energy, besides considerably reducing the emission of CO, which contributes to reduce the environmental problem associated with the burning of fossil fuels.

Keywords: triple-burning, single-burning, combustion, biomass, wood stoves.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição níveis de qualidade ar.....	26
Tabela 2 - Níveis químicos em relação a combustão carvão.....	27
Tabela 3 - Dados referentes a combustão de derivados de madeiras.....	27
Tabela 4 - Componentes das madeiras e comparação com dados da literatura.....	32
Tabela 5 - Análise imediata da madeira em comparação aos dados obtidos da literatura.....	33

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aumento do uso de fontes renováveis para produção de energia.....	14
Figura 2 - Custo de energia relacionado a potência.....	16
Figura 3 - Exemplo de instalação e circulação de água aquecida por meio de fogão utilizando biomassa.....	17
Figura 4 - Combustão da biomassa mostrando a relação entre combustível, comburente e processo de ignição.....	18
Figura 5 - Representação de um fogão a combustão simples.....	22
Figura 6 - Processo de dupla combustão.....	23
Figura 7 - Processo de combustão tripla.....	24
Figura 8 - Representação esquemática do fogão à lenha de combustão simples utilizado nos experimentos.....	30
Figura 9 - Representação esquemática do fogão à lenha de combustão tripla utilizado nos experimentos.....	31
Figura 10 - Curvas termogravimétricas das amostras de madeira estudadas.....	34
Figura 11 - Temperatura dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	35
Figura 12 - Umidade dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	36
Figura 13 - ppm CO dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	37
Figura 14 - Processo de combustão tripla mostrando as zonas de convergência e (a) entrada primária de ar, (b) entrada secundária de ar e (c) entrada adicional (terciária) de ar.....	38
Figura 15 - ppm CO ₂ dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	39
Figura 16 - TVOC dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	40
Figura 17 - HCHO dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b)	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Hu	Base úmida [kg]
Hs	Base seca [kg]
Pt	Massa úmida [kg]
Os	Massa seca [kg]
Q_u	Energia útil produzida [J]
$\sum E1$	Energia total que entra [m]
$\sum perdas$	Soma total de todas de percas de calor e energia na operação do sistema [m]
Qr	Transferência de calor por radiação [W/(mK)]
ε	Emissividade da superfície emissora ($0 < \varepsilon \leq 1$)
A	Área específica [mm^2]
T_s	Temperatura absoluta [$^{\circ}C$]
k	Coefficiente de condutividade térmica do material [W/(mK)]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/(m ² K)]
α	Difusividade térmica [m ² /s]
q_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção [W]
q_x	Taxa de transferência de calor [W]

$$\frac{dT}{dx}$$

Varição da temperatura em relação ao tempo [°C]

LISTA DE ABREVIACÕES

GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANNEE	Agência Nacional de Energia Elétrica
RGE	Rio Grande Energia
OMS	Organização Mundial da Saúde
IQA	Índice de Qualidade do Ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	PROJETO DE PESQUISA	9
2.1	TEMA	9
2.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	9
2.3	OBJETIVO GERAL	10
2.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	11
3.1	BIOMASSA	11
3.1.1	Características da biomassa como fonte de energia.....	11
3.1.2	Geração de energia a partir da biomassa	13
3.1.3	Energia da biomassa	15
3.1.4	Biomassa para aquecimento de água em residências	15
3.2	COMBUSTÃO	18
3.2.1	Eficiência da combustão	19
3.3	FOGÃO A LENHA.....	21
3.3.1	Fogão a lenha simples.....	22
3.3.2	Fogão a lenha dupla queima	22
3.3.3	Fogão a lenha tripla queima.....	23
3.4	POLUIÇÃO DO AR	24
3.5	ESTUDOS SOBRE GERAÇÃO DE GASES E PARTICULADOS GERADOS DURANTE A COMBUSTÃO DA BIOMASSA	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Materiais	29
4.2	Caracterização das amostras de madeira	29
4.3	Análise imediata	29
4.4	Análise Termogravimétrica	29

4.5 Combustão das amostras de madeira	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Componentes da madeira.....	32
5.2 Análise imediata das espécies de madeira.....	33
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação mundial com o aumento do consumo de energia associado aos problemas ambientais causados com o uso de combustíveis fósseis vem se tornando a força motriz para impulsionar processos de geração de energia mais sustentáveis (SILVA et al., 2018). Os combustíveis fósseis ainda são importantes fontes de energia para muitos países em desenvolvimento (OLAVE et al., 2017).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021) ressaltam que no Brasil 14 milhões de lares usavam lenha ou carvão para preparar suas refeições em 2019, aumento de 3 milhões em relação a 2016 no mesmo período, o que pode estar relacionado aos constantes aumentos do gás liquefeito de petróleo (GLP). Isso demonstra que o cenário de crise energética em diversos setores acaba resultando no uso de fontes de energia mais viáveis economicamente, como a biomassa. Contudo, isso pode gerar consequências em alguns aspectos, já que a troca de combustível como o GLP para biomassa, como por exemplo a madeira, pode gerar diferentes gases poluentes na atmosfera.

No entanto, muitas famílias estão migrando para a utilização de fogões a lenha. A lenha é uma forma mais econômica na preparação de alimentos em regiões mais pobres e isoladas, e onde existe mais facilidade de se encontrar esse combustível de forma mais barata, o que ocorre principalmente em regiões agrícolas (FUNDAÇÃO ABRINQ, 2019). Em contrapartida, na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26), foi estabelecida a meta de zerar emissões de carbono até 2050 fornecendo incentivos financeiros para a produção de energias renováveis (COP26, 2021).

Desta forma, o presente trabalho irá comparar o desempenho de um fogão a lenha com o sistema de combustão simples, em relação a um fogão a lenha utilizando um sistema de combustão tripla. Os gases poluentes gerados durante a queima, tais como CO e CO₂, também serão avaliados, bem como a temperatura e umidade dos gases de combustão. Esses gases são gerados em decorrência da queima de madeira na fornalha. O intuito é realizar testes utilizando madeira de pinus e de eucalipto, visto que ambas são madeiras utilizadas na Região Sul do Brasil na geração de calor em residências (SILVA et al., 2018).

2 PROJETO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta os assuntos referentes ao tema, justificativa do tema, objetivo geral, objetivos específicos e ambientes de realização do trabalho.

2.1 TEMA

O tema proposto é de executar um estudo da quantidade de gases gerados provenientes de queima de biomassas específicas, relacionando dois diferentes sistemas de combustão simples e tripla. A análise visa principalmente à comparação entre os dois sistemas específicos.

2.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A GUINDANI FOGÕES possui em torno de 74 anos de fundação e atua na Serra Gaúcha desde sua criação. Fundada em 2 de fevereiro de 1947 por Antônio Gracioso Guindani.

A Guindani é uma empresa do ramo metalúrgico voltada a desenvolver fabricar e vender produtos de altíssima qualidade no ramo de fogões a lenha. A companhia produz em série uma ampla linha a gás, como fogões semi-industriais, fogões para churrasqueiras, sanduicheiras, aquecedores e fogareiros. Também atua com produtos em aço inoxidável, como serpentinas para fogões e lareiras e produtos hospitalares sob encomenda.

Devido ao desenvolvimento tecnológico ocorrido no cenário mundial, e a preocupação de formas de energias sustentáveis e ecológicas, a empresa buscou melhorias em seus produtos para que possa se manter de forma competitiva e sólida no mercado nacional, um dos principais produtos fabricados na empresa é o fogão a lenha. A empresa tem investindo no desenvolvimento de um fogão a lenha com um sistema de queima mais eficiente e ecológico.

Sendo assim foi desenvolvido um sistema de combustão a biomassa, onde é possível aumentar o poder energético e reduzir a emissão de gases nocivos ao ambiente, conhecido como tripla queima.

2.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar os gases gerados na combustão de biomassa comparando os teores obtidos utilizando um forno de combustão simples e um de combustão tripla.

2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar o efeito da combustão simples e da combustão tripla na temperatura e na umidade dos gases emitidos durante a queima de madeiras de pinus e de eucalipto.
- b) Comparar se ocorre redução da emissão de poluentes entre um forno a combustão simples e um de combustão tripla analisando gases provenientes da combustão, tais como CO e CO₂.
- c) Mensurar os teores de compostos orgânicos voláteis totais (TVOCs) e de formaldeído (HCHO) presentes nos gases oriundos da queima e verificar os efeitos da combustão simples e da combustão tripla na emissão destes compostos.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que serve como base teórica para o estudo proposto. Serão apresentados os tópicos relevantes à combustão, emissões de poluentes gasosos, poluição do ar, fornos a lenha, biomassa, entre outros tópicos relevantes para a compreensão do tema estudado.

3.1 BIOMASSA

Biomassa é toda forma de matéria orgânica vegetal ou animal, que pode ser utilizada de forma a ser aproveitada para gerar energia. De maneira mais convencional é utilizado por forma de combustão, onde resíduos provenientes do meio natural são queimados assim gerando energia térmica. A biomassa é composta em sua maior parte de carbono e hidrogênio (PROTO et al., 2021).

3.1.1 Características da biomassa como fonte de energia

Schurhaus (2007) citam que as características elementares da biomassa que a definem para uso como fonte de energia são basicamente: composição química, umidade e poder calorífico. Os principais componentes da biomassa são carbono, hidrogênio, celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é um polímero linear com unidades de glicose interligadas e que apresenta estrutura com regiões de ordenação cristalina, mas também possui regiões amorfas. A hemicelulose possui estrutura relativamente amorfa. Por outro lado, a lignina é basicamente um polímero de cadeias aromáticas. A biomassa também possui extrativos e materiais inorgânicos em sua composição (MALLICK et al., 2020).

De acordo Schurhaus (2007) a composição química elementar da biomassa é relacionada a um percentual em massa dos elementos que a constituem levando em conta a matéria seca.

Os elementos a serem observados são: (C) carbono, (H) hidrogênio, (S) enxofre, (O) oxigênio, (N) nitrogênio, além do teor de cinzas. A composição química elementar constitui a base dos cálculos de combustão. A composição química imediata, trata do conteúdo percentual, baseado na massa do combustível, do carbono fixo (F), materiais voláteis (V), cinzas (A) e umidade (W).

Os voláteis expressam a facilidade de queimar um material. A determinação do teor de voláteis está baseada na fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada, em atmosfera inerte, até a temperatura de 850 °C, por 7 minutos. A fração de carvão que permanece na amostra logo após este aquecimento é chamado de carbono fixo (DINIZ, 2014).

Já a umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre a massa de uma amostra, antes e logo após ser submetida a secagem. É possível apresentar os valores de umidade em base seca ou úmida.

A Equação 1 é utilizada para determinar o teor de umidade em base seca (Hs), enquanto a Equação 2 pode ser usada para calcular o teor de umidade em base úmida (Hu):

$$Hs = \frac{P_t - P_s}{P_s} \quad (1)$$

Onde:

Hs = Teor de umidade base seca;

Pt = Valor de massa úmida;

Ps = Valor de massa seca.

$$Hu = \frac{P_t - P_s}{P_t} \quad (2)$$

Onde:

Hu = Teor de umidade base úmida;

Pt = Valor de massa úmida;

Ps = Valor de massa seca.

Onde, Pt e Ps correspondem respectivamente aos valores de massa de uma mesma amostra de combustível nas condições de queima úmida e seca, que é o estado da biomassa seca em estufa a 105 °C até obter massa constante.

O poder calorífico é a quantidade de calor que se libera durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível (DINIZ, 2014).

Pode-se dizer que o poder calorífico inferior, (não se condensam os vapores de água presentes nos gases de combustão), se refere ao calor efetivamente possível de ser

utilizado nos combustíveis, enquanto o poder calorífico superior, (se condensam os vapores de água presentes nos gases de combustão), é em torno de 10 a 20 % mais elevado.

Para avaliar o poder calorífico dos combustíveis sólidos de biomassa, a condição mais usual é utilizar uma bomba calorimétrica. Nela pressuriza um volume com oxigênio e se efetua uma queima, medindo-se o calor liberado pela variação da temperatura da água em um vaso onde foi colocado a bomba.

Nos cálculos de rendimentos dos sistemas de combustão podem-se adotar ambos os tipos de poder calorífico. A eficiência referida a PCI é superior ao valor determinado segundo o PCS.

3.1.2 Geração de energia a partir da biomassa

Existem diversas formas de transformar a biomassa em energia. As mais usuais são:

Pirólise: é um processo de decomposição térmica da biomassa na presença controlada de oxigênio e que tem como produtos compostos na fase gasosa, líquida e sólida. O gás é composto por CO, CO₂, hidrogênio e hidrocarbonetos de baixa massa molar. O líquido obtido é oriundo da condensação de gases, denominada líquido pirolenhoso, e o sólido é denominado de bio-carvão CORTEZ (2009).

Gaseificação: é uma tecnologia aplicada em resíduos orgânicos urbanos e industriais e em madeiras. A gaseificação consiste na conversão de fontes de biomassa sólidas em gasosas através de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar ou oxigênio em quantidades inferiores ao mínimo para que haja a combustão. (SILVA, 2001).

Combustão: a queima da biomassa é realizada a altas temperaturas na presença abundante de oxigênio. (SILVA, 2004).

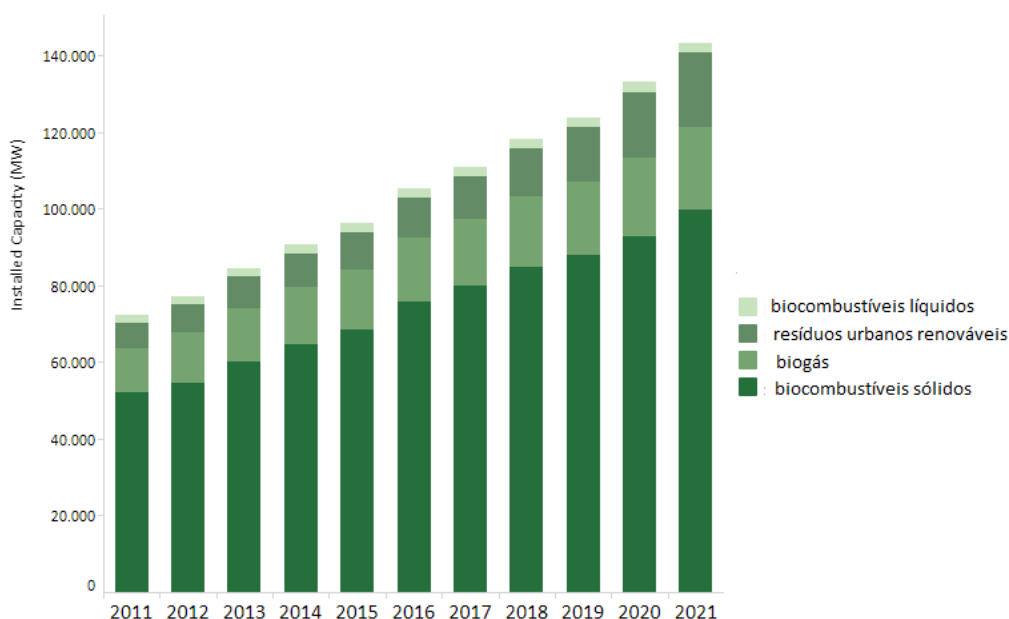
Co-combustão: essa prática propõe a substituição de parte do carvão mineral, utilizado em usinas termelétricas, por biomassa. Dessa forma, reduz-se significativamente a emissão de poluentes. A faixa de desempenho da biomassa encontra-se entre 30 e 37%, sendo, por isso, uma escolha atrativa e econômica (SILVA,2004).

No Brasil, a biomassa é a segunda maior fonte de geração de energia, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), destacando a importância dessa fonte para a produção de energia elétrica (SILVA, 2004).

Segundo dados o uso da bioenergia se divide em duas categorias principais: “tradicional” e “moderno” (IRENA, 2021). O uso tradicional refere-se à combustão de

biomassa em formas como madeira, resíduos animais e carvão vegetal tradicional. As tecnologias modernas de bioenergia incluem biocombustíveis líquidos produzidos a partir do bagaço e de outras plantas; biorrefinarias; biogás produzido por digestão anaeróbica de resíduos; sistemas de aquecimento de pellets de madeira; e outras tecnologias. A Figura 1 ilustra o avanço da geração de energia a partir de fontes renováveis ou recicláveis no período compreendido entre 2011 e 2021.

Figura 1: Aumento do uso de fontes renováveis para produção de energia.



Fonte: IRENA (2021).

A biomassa tem um potencial significativo para aumentar a oferta de energia em nações populosas com demanda crescente, como Brasil, Índia e China. Pode ser queimada diretamente para aquecimento ou geração de energia, ou pode ser convertido em substitutos de petróleo ou gás. Os biocombustíveis líquidos, um substituto renovável conveniente para a gasolina, são usados principalmente no setor de transporte.

O Brasil é líder em biocombustíveis líquidos e possui a maior frota de veículos flexíveis, que podem rodar com bioetanol – um álcool produzido principalmente pela fermentação de carboidratos em culturas de açúcar ou amido, como milho, cana-de-açúcar ou sorgo sacarino (IRENA, 2021).

3.1.3 Energia da biomassa

A biomassa cultivada por meios sustentáveis é classificada como uma fonte renovável de energia devido a sua produção menos agressiva ao meio ambiente e matéria-prima utilizada. Além disso, como a biomassa vem de matéria orgânica durante seu crescimento absorve CO₂ do ambiente, contribuindo para a redução do efeito estufa.

Segundo relatório publicado pela ANNEL (2015), em torno de 14% da energia mundial gerada é relacionada à biomassa.

A área total de árvores plantadas no Brasil atingiu 7,8 milhões de hectares em 2015, sendo 5,6 (71,79%) e 1,6 (20,51%) milhões ocupados por cultivos de Eucalyptus e Pinus, respectivamente (KRATZ, 2016).

O gênero Eucalyptus continua a ter preferência em plantios comerciais, devido ao seu curto período de rotação, ao contrário de Pinus, que é mais usado como principal fonte de energia para as empresas, devido ao seu poder energético (MBANZE, 2018).

Uma das formas de utilização da biomassa é através da queima direta para produzir energia térmica e elétrica. É uma fonte primária de energia e que está em desenvolvimento em muitos países (MBANZE, 2018).

Outra forma de utilização é através do processamento da biomassa para produção de combustíveis. O processamento pode ser realizado através de processos químicos, como a gaseificação, ou através de processos biotecnológicos, como a fermentação. Como exemplos, pode-se citar o álcool. O óleo vegetal obtido de mamona ou de colza, e o biodiesel, obtido pela esterificação do óleo vegetal, também são utilizados como combustíveis em motores diesel. A diferença básica entre os dois está na forma de obtenção e na maior viscosidade do óleo vegetal (GENOVESE, 2006).

3.1.4 Biomassa para aquecimento de água em residências

Diversos países buscam encontrar maneiras de gerar energia de maneira mais barata e eficaz, principalmente em meios urbanizados onde o custo de energia tem subido constantemente.

Segundo CIVIDINI (2017), um dos principais fatores que tornam esse custo mais relevante nas residências é o banho onde foi realizado um breve estudo que consiste em medir diferentes potências de chuveiros elétricos analisando o custo médio entre eles.

Essa análise foi executada da seguinte maneira, foi proposto uma média considerando uma residência com 3 pessoas, onde cada integrante gasta aproximadamente 15 minutos de banho diário, considerando um mês com 30 dias.

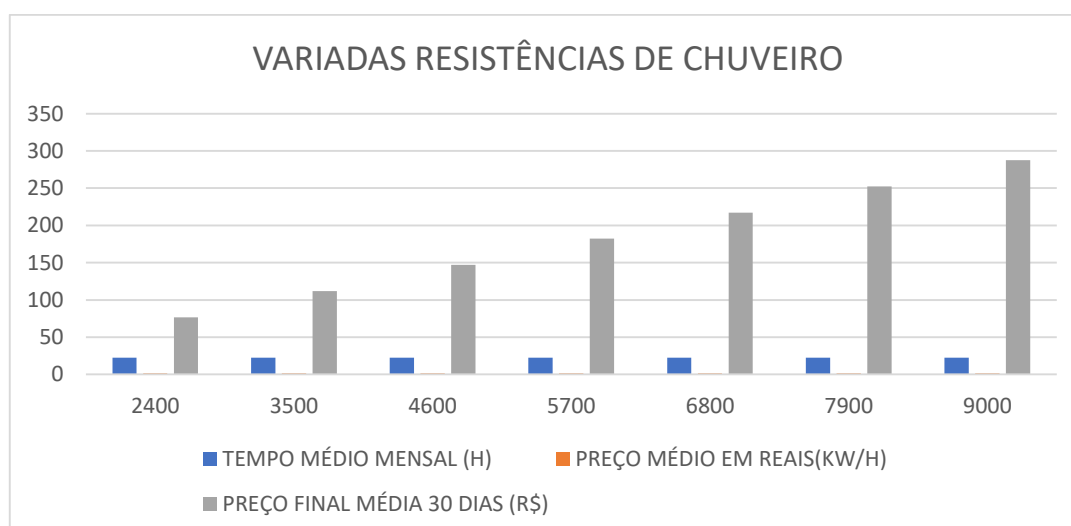
Os produtos (chuveiros), relacionados na análise foram selecionados em classificação da média mais utilizada na região.

A companhia responsável pela distribuição e manutenção de energia é a empresa RGE, segundo dados da empresa o valor de 100kwh e R\$14,20 durante o período de realização do estudo.

Conforme dados obtidos utilizando o software Excel foram obtidas as informações mostradas na Figura 2 relacionando custo de energias em potencias diferentes.

Figura 2: Custo de energia relacionado a potência.

POTÊNCIA(W)	TEMPO MÉDIO MENSAL (H)	PREÇO MÉDIO EM REAIS(KW/H)	PREÇO FINAL MÉDIA 30 DIAS (R\$)
2400	22,5	1,42	76,68
3500	22,5	1,42	111,83
4600	22,5	1,42	146,97
5700	22,5	1,42	182,12
6800	22,5	1,42	217,26
7900	22,5	1,42	252,41
9000	22,5	1,42	287,55



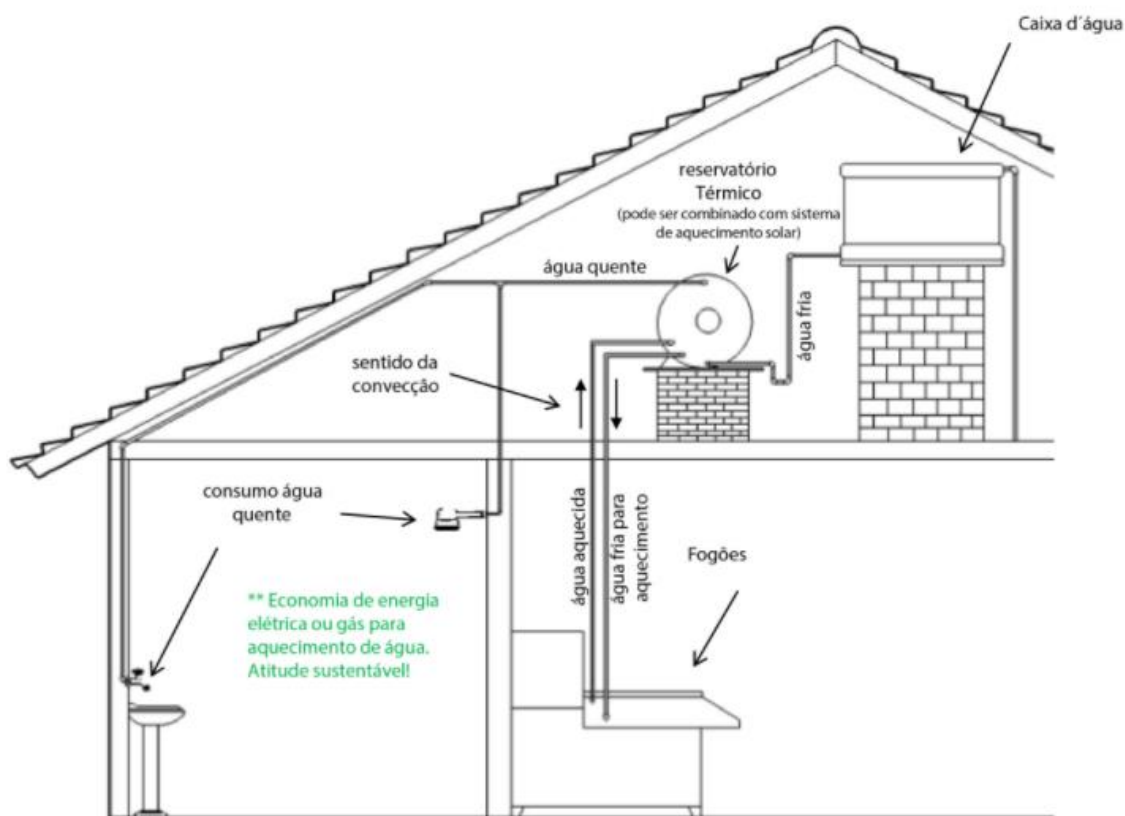
Fonte: autor (2022).

De acordo com esse resultado pode-se observar que um dos custos relevantes de consumo de energia nas residências é o chuveiro elétrico, pois uma família que use em

média 22,5 horas mensais de banho com um chuveiro de 4600 W de potência, terá um custo em torno de R\$ 146,97 de energia mensal.

Relacionado a esse estudo uma das várias utilizações da energia de biomassa em utilização residencial seria como aquecimento da água para ser utilizada no banho ou demais usos, reduzindo drasticamente o custo e a utilização de energia elétrica. No entanto para que isso seja possível pode ser instalado serpentinas em fogões a lenha, lareiras, basicamente a serpentina seria posta em contato com a queima da biomassa no interior da fornalha do equipamento, realizando assim a troca térmica com a água que esfria em circulação no interior da serpentina, a água normalmente é armazenada em um boiler, sendo posteriormente distribuída na residência, conforme pode-se observar na Figura 3.

Figura 3: Exemplo de instalação e circulação de água aquecida por meio de fogão utilizando biomassa



Fonte: fogoes antonow(2009).

O estudo realizado por CIVIDINI (2017) demonstra que é possível reduzir o custo da energia elétrica relacionado ao aquecimento de água para usos diversos utilizando biomassa.

3.2 COMBUSTÃO

O conceito de combustão é definido como uma reação química envolvendo uma matéria e um comburente normalmente o oxigênio, assim ocorre a liberação de energia em forma de calor (TURNES, 2013).

Materiais orgânicos como madeira e demais resíduos naturais, podem ser submetidos a combustão que de certo modo irá resultar na geração de energia. A Figura 4 mostra o processo de combustão com base no combustível, comburente e processo de ignição para gerar calor (TURNES, 2013).

Figura 4: Combustão da biomassa mostrando a relação entre combustível, comburente e processo de ignição.



Fonte: Control tecnologia em combustão.

Normalmente esse processo de combustão acontece em fornos e fogões, esse sistema é considerado bem prático pois, trata de apenas alguns processos, como ter um gás comburente como o oxigênio, o combustível (biomassa) e uma centelha inicial isso tudo resulta em energia térmica. A combustão do carvão é definida pela Equação 3:



3.2.1 Eficiência da combustão

O resultado esperado da queima de um combustível é o uso da energia transformada, normalmente isso é feito com a geração de vapor de algum líquido ou o aquecimento de algum material ou produto. Independentemente de seu uso a energia inserida no sistema na forma de poder calorífico do combustível, é transformado em calor que possa se aproveitar e também em perdas de calor de acordo com a Equação 4:

$$Q_u = \sum E1 - \sum perdas \quad (4)$$

Q_u = Energia útil produzida;

$\sum E1$ = Energia total que entra;

$\sum perdas$ = Soma total de todas de perdas de calor e energia na operação do sistema.

A eficiência energética está relacionada com diversos fatores. Dentre os principais, o uso e dimensionamento dos equipamentos que farão a queima do combustível para liberação de energia, podem ser destacados (LICKS, 2010).

Entre as perdas mais recorrentes observadas estão as perdas de calor pela chaminé, relacionadas à queima incompleta do combustível onde isso acaba expelindo restos de gases e fuligem que não foram queimadas totalmente, isso pode ser relacionado ao fato de desajuste da relação ar/combustível, ao déficit ou excesso de oxigênio na combustão ou temperaturas muito elevadas. Existem também perdas provocadas por radiação, convecção e condução (BUENO, 2011).

A radiação é emitida pela matéria quando ocorre a mudança na sua configuração eletrônica dos átomos ou moléculas em seu interior, a energia é transportada por ondas eletromagnéticas ou fótons, conhecida também como irradiação ocorre em forma de ondas de calor onde não é necessário um contato físico. Um exemplo é a luz do sol que aquece nosso sistema em forma de irradiação gerando calor (BUENO, 2011).

De acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann tem-se por definição a Equação 5 para radiação entre corpos ideais:

$$q_r = \sigma \varepsilon A T_s^4 \quad (5)$$

Onde:

q_r = Transferência de calor por radiação;
 σ = Constante de stefan-boltzmann;
 ε = Emissividade da superfície emissora ($0 < \varepsilon \leq 1$);
 A = Área;
 T_s = Temperatura absoluta.

Convecção é a transferência de calor de um local até outro, onde isso é realizado na forma da variação de volumes dos gases ou fluidos, realizando a troca térmica com sólidos onde eles aquecem ou resfriam, dependendo de suas características físicas. Um exemplo é o sistema de ar condicionado onde um gás específico é comprimido rapidamente resfriando, desse modo se insere ar frio no ambiente interno a ser resfriado, com auxílio de ventilação mecânica e se retira ar quente para o ambiente externo.

A Equação 6 que define a lei de convecção térmica:

$$q_{conv} = Ah(\Delta T) \quad (6)$$

Onde:

q_{conv} = Taxa de transferência por convecção;
 h = Coeficiente convectivo de transferência de calor;
 ΔT = Diferença de temperatura;
 A = Área da superfície.

O conceito de condução térmica determina que partículas de uma região com maior temperatura transferem sua agitação térmica, para as partículas quem estão em uma região próxima com uma temperatura inferior. Um exemplo de condução térmica é uma barra de metal que vai distribuir a temperatura em toda sua área quando submetida a um aquecimento.

A Equação 7 define a lei de condução térmica:

$$qx = -kA \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Onde:

qx = Taxa de transferência de calor por condução;

k = Condutividade térmica do material;

A = Área do material;

$\frac{dT}{dX}$ = Gradiente de temperatura dado pela diferença da temperatura em relação ao comprimento.

Demais fatores de redução de eficiência são as entradas de ar falso por portas e frestas. Esse tipo de problema pode afetar drasticamente no desempenho energético do equipamento em questão, pois se for alimentado com oxigênio superior ao necessário para a queima do combustível, a combustão não será tão eficiente tendo como resultado a repulsão dos excessos de gases no fluxo de ar de saída (SMITH, 2004).

Outros fatores como a qualidade do combustível, umidade, dimensões, impurezas ou contaminantes, esse aspecto se refere à qualidade de queima do material em questão, já que existem variados tipos de biomassa e entre os diversos tipos existem algumas mais eficientes em aspectos de combustão. A umidade é outro fator a ser considerado, pois se o combustível estiver muito úmido atrapalha no aquecimento durante a combustão (SMITH, 2004).

3.3 FOGÃO A LENHA

Conforme a Organização Mundial de Saúde (OMS), mais de três bilhões de pessoas no mundo dependem de combustíveis sólidos, incluindo lenha, carvão mineral, carvão vegetal e resíduos orgânicos para realizar tarefas que atendam necessidades básicas como cozinhar, ferver a água e aquecer o ambiente (GODOY, 2008).

No Brasil, o alto custo ou a inacessibilidade ao botijão de gás obriga as parcelas mais carentes da população a utilizarem fogões a lenha primitivos, com baixo aproveitamento energético e que gera fumaça no ambiente. Dados do Boletim Energético Nacional de 2006 publicados pelo Ministério de Minas e Energia, mostram que a lenha é a principal fonte do consumo total de energia residencial no Brasil, representando 37,5% do total (GODOY, 2008).

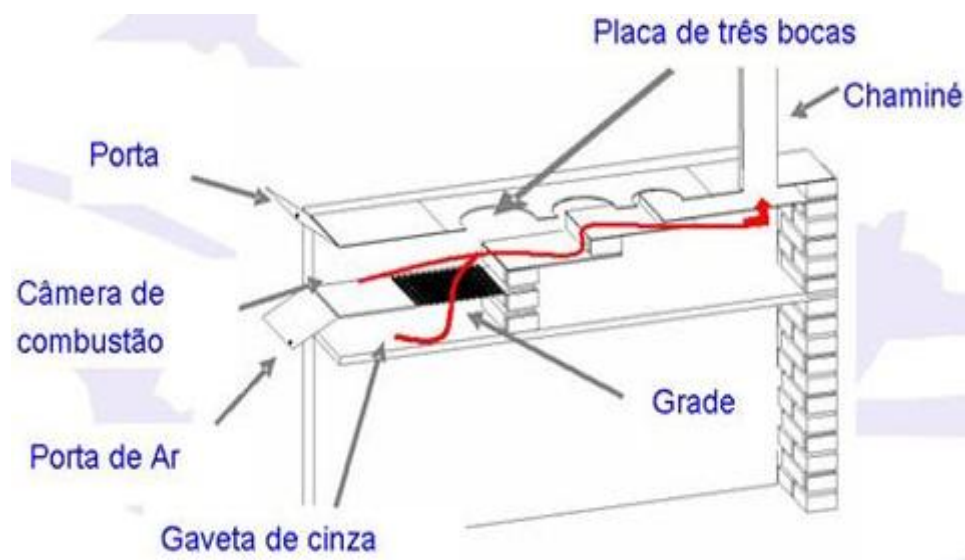
As outras fontes utilizadas, em ordem decrescente, são eletricidade (33,4%) e gás liquefeito (25,5%). Frequentemente, o fogão a lenha é utilizado como complemento ao gás de cozinha (GODOY, 2008).

3.3.1 Fogão a lenha simples

O princípio de funcionamento de um fogão a lenha consiste em inserir um combustível, gás comburente (AR) e uma centelha primária (VLASSOV, 2001).

Um fogão de combustão simples consiste em uma fornalha de ferro ou tijolo dependendo da configuração do produto, onde seu volume é variado. No interior da câmara (fornalha) é posto a lenha (combustível) e de acordo com essa configuração é feito a sucção do ar pelo respiro onde é feita a alimentação principal para a realização da combustão da biomassa. Normalmente o respiro se encontra na parte frontal do equipamento inserindo seu fluxo de ar abaixo da fornalha onde acontece a queima, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Representação de um fogão a combustão simples.



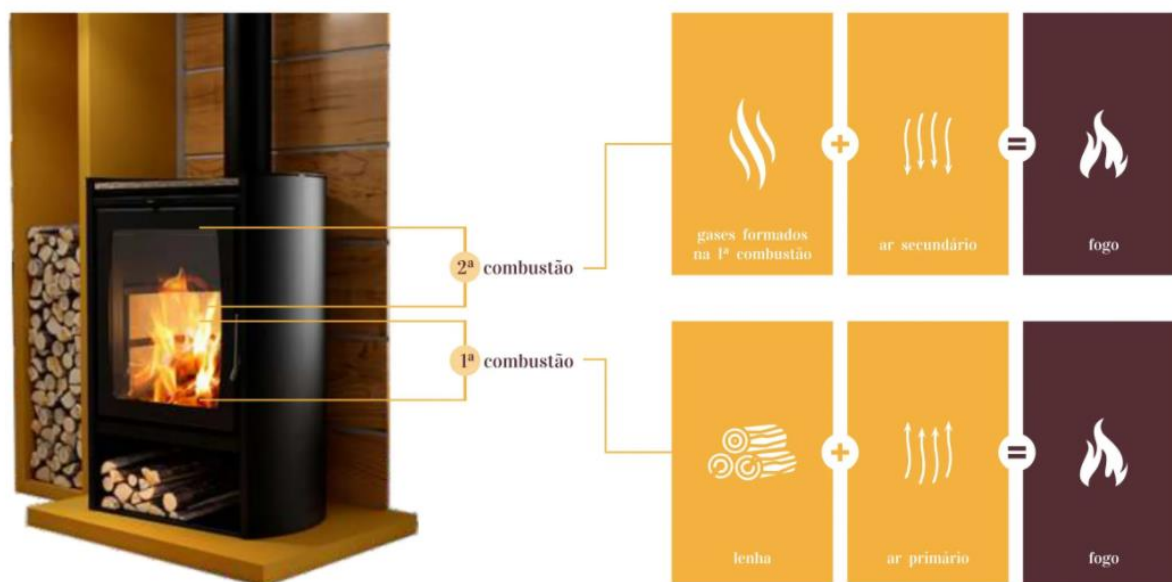
Fonte: Associação Caatinga (2009).

3.3.2 Fogão a lenha dupla queima

Algumas empresas desenvolveram um sistema conhecido como dupla queima, basicamente como o sistema de combustão simples insere apenas uma porção de ar para realizar a queima, os gases e fumaça com alguns sólidos tendem a se direcionar para a parte superior da fornalha do equipamento, então é inserido um templador na parte de cima onde ocorre a primeira queima do combustível retardando a saída desses gases, onde posteriormente é injetado uma segunda onda de ar na parte onde gases estão convergindo

assim forma-se a segunda queima dos gases e resíduos que iriam escapar para o meio externo. Todo esse processo é chamado de dupla queima, como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Processo de dupla combustão.

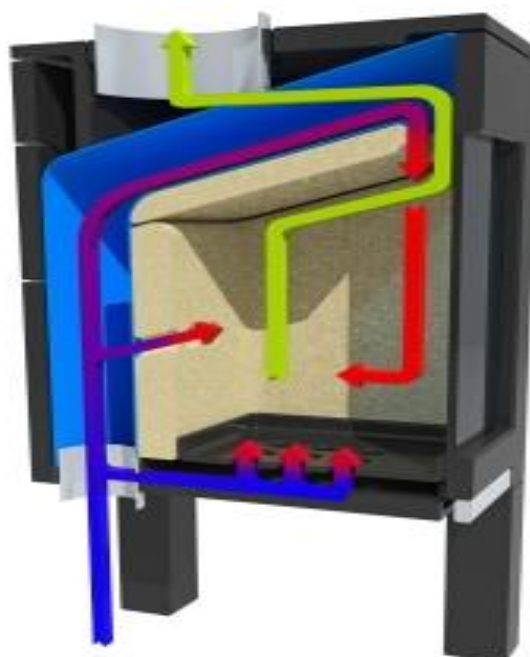


Fonte: fogão a lenha liv (2018).

3.3.3 Fogão a lenha tripla queima

O sistema de dupla queima já se mostra muito eficiente em questão de queima e redução de poluentes. Contudo ainda existem gases que teriam um potencial de queima ainda mais eficazes dessa forma foi desenvolvido um sistema mais eficiente conhecido com sistema tripla queima, onde além da dupla queima é inserido uma terceira zona de combustão, assim além de inserir o oxigênio por duas direções o templador da câmara é desenvolvido com uma geometria que lembra uma escada. Desta forma, os gases provenientes da primeira queima se dirigem a parte superior e convergem em duas posições específicas, sendo assim inserido o ar para a sequência de queimas (VLASSOV,2001).

Figura 7: Processo de combustão tripla



Fonte: Smartfire (2022).

3.4 POLUIÇÃO DO AR

Poluição do ar basicamente se define por qualquer substância que devido sua quantidade, tenha potencial de se tornar prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente em geral. Também é chamada de poluição atmosférica e expressa a contaminação do ar por gases, líquidos e sólidos em suspensão.

Segundo dados da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 2014, foram constatados óbitos de cerca de mais de 7 milhões de pessoas recorrentes a problemas relacionados a poluição do ar, segundo esses dados os níveis de óbitos foram superiores a AIDS e a malária juntas (FERNANDES, 2021).

O Índice de Qualidade do Ar (IQA) determina números em uma escala de 0 a 400 e normalmente com esses dados se estipula se a qualidade do ar está em um nível aceitável.

De acordo com padrões definidos de qualidade, o IQA estipula 7 padrões de poluentes:

1. Partículas Totais em Suspensão (PTS)
2. Fumaça
3. Partículas inaláveis (PI ou PM10)
4. Dióxido de Enxofre (SO₂)
5. Monóxido de Carbono (CO)
6. Ozônio (O₃)
7. Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

O valor do IQA é obtido através de uma função linear segmentada, na qual os pontos de inflexão representam os padrões de qualidade do ar e os níveis de qualidade do ar definidos na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 03/1990 (CONAMA, 1990) e no Decreto Estadual nº 1.745/1979.

A fórmula para o cálculo do IQA é apresentada na Equação 8:

$$IQ_{ar} = Ii + \frac{If}{cf-ci} * (Cm - Ci) \quad (8)$$

I_{qar} = Índice qualidade do ar;

I_i = Valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa;

I_f = Valor do índice que corresponde à concentração final da faixa;

C_m = Concentração medida;

C_i = Concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida;

C_f = Concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

De acordo com os resultados dos cálculos realizados ficam definidos os seguintes níveis de qualidade, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Definição níveis de qualidade ar

concentrações ($\mu\text{g m}^3$)	qualidade do ar	efeitos sobre a saúde
0 a 80	BOA	
81 a 120	REGULAR	Pessoas de grupos sensíveis como crianças idosos e portadores de doenças respiratórias e cardíacas podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população em geral não é afetada.
121 a 240	MODERADA	
241 a 375	INADEQUADA	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis podem apresentar efeitos mais sério à saúde.
376 a 625	MÁ	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis.
626 a 875	PÉSSIMA	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.
maior que 875	CRÍTICA	

Fonte: SEMARH-GO (2009).

O órgão responsável pela regulamentação e aplicabilidade no estado do Rio Grande do Sul é a FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler), onde de acordo com diretriz técnica Nº 01/2018, estabelece condições e os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos a serem adotados pela FEPAM para fontes fixas.

Segundo texto publicado pela FEPAM, poderão excepcionalmente, serem autorizadas emissões atmosféricas acima dos padrões estabelecidos nesta Diretriz Técnica, desde que observados os três requisitos a seguir:

I - A fonte ser existente em dezembro de 1990;

II - A fonte ter sido, comprovadamente, submetida a todas as melhorias técnicas e economicamente viáveis, sem alcançar os níveis de emissão exigidos, mas que comprovem ganhos ambientais com as alterações realizadas;

III - estudo de impacto ambiental e dispersão das emissões, às expensas do empreendedor responsável pela fonte de emissão, que mostre a manutenção dos padrões de qualidade do ar no entorno do empreendimento.

Segundo dados da FEPAM é estipulado um limite máximo de emissão para combustão externa de carvão mineral e assemelhados.

Os valores são expressos em mg/Nm^3 , base seca, na condição referencial de oxigênio de 6 %, conforme pode-se observar na Tabela 2.

Tabela 2: Níveis químicos em relação a combustão carvão

A partir da combustão externa de carvão mineral e assemelhados							
potência térmica nominal(MW)	densidade colorimétrica	MP-total	CO	Nox	Sox	parâmetros	frequência
até 10	20% equivalente ao padrão 1 da escala rigelmann	300	500	1600	2700	MP- total,CO,Nox,Sox e O2	ANUAL
maior que 10 até 70		200	500	800	2200		
maior que 70 até 500		80	500	750	1300		
maior que 500 até 1000		65	250	600	950		
maior que 1000		50	250	400	400		

Fonte: FEPAM.

A Tabela 3 mostra os dados de combustão de derivados de madeira de acordo com a potência térmica nominal instalada no empreendimento.

Tabela 3: Dados referentes a combustão de derivados de madeiras

Dados combustão de derivados de madeira						
Potência térmica nominal (MW)	densidade colorimétrica	MP- total	CO	Nox	Parametros	Frequência
Até 0,05	20% equivalente ao padrão 1 da escala ringelmann	730	6500	NA	MP-total, CO e O2	1 vez a cada renovação de LO
Maior que 0,05 até 0,15		730	3250	NA		
Maior que 0,15 até 1		730	1700	NA		
Maior que 1 até 10		730	1300	NA		
Maior que 10 até 30		520	1300	650	MP-total, CO, NOx e O2	Anual (se >1000MW,contínuo)
Maior que 30 até 70		260	1000	650		
Maior que 70		130	1000	650		

Fonte: FEPAM.

3.5 ESTUDOS SOBRE GERAÇÃO DE GASES E PARTICULADOS GERADOS DURANTE A COMBUSTÃO DA BIOMASSA

Mota (2014), avaliou os teores de materiais particulados emitidos por um forno a lenha em uma pizzaria na cidade de São Paulo. Segundo o autor o estudo se baseou em analisar amostragens do ambiente interno e externo (chaminé), realizando o processo de coleta para análises antes e após o forno ser utilizado. Para coleta dos particulados os

autores utilizaram um amostrador de resíduos particulados. Os resultados demonstraram uma variação considerável na concentração de massa retida nos filtros, sendo de aproximadamente 44,4 a 389,7mg/m internamente do equipamento e cerca de 78,9 a 20380,0 mg/m encontrado no ambiente externo.

Cardoso et al (2010) avaliaram o efeito da queima dos gases despreendidos durante a combustão de eucalipto em uma câmara secundária construída após a fornalha. Os autores verificaram que não houve liberação de fumaça visível pela chaminé, como ocorre em sistemas sem a câmara secundária. Por outro lado, o sistema de queima dos gases reduziu em 96% e 93% a emissão de metano e monóxido de carbono, respectivamente.

Vicente et al (2018) avaliaram a emissão de gases e de particulados em churrasqueiras domésticas utilizadas em Portugal. Os autores quantificaram uma emissão de $219 \pm 44,8$ g/kg para CO, $3,01 \pm 0,70$ g/kg para NO₂ e $4,33 \pm 1,53$ g/kg para carbono orgânico total (TOC). A emissão de particulados foi de $7,38 \pm 0,35$ g/kg de carvão em base seca utilizado durante a queima, o que segundo os autores é similar, em ordem de magnitude, a outros fornos domésticos que usam madeira como combustível.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As amostras de madeira foram obtidas no comércio da cidade de Bento Gonçalves e também foram plantadas e cultivadas no mesmo município. As madeiras utilizadas para os testes são oriundas das espécies de *Pinus elliotti* (PIE) e *Eucalyptus grandis* (EUG).

4.2 Caracterização das amostras de madeira

A determinação dos componentes básicos da madeira, tais como extrativos, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas (teor de inorgânicos) foi realizada no Laboratório de Estudos do Sistema Solo, Planta e Atmosfera e Metabolismo Vegetal (LESPA) da UCS em triplicata. A determinação de extrativos seguiu a norma TAPPI T204 cm 97 utilizando como solução extratora etanol/benzeno na proporção 1:2 v/v. A determinação de lignina foi realizada segundo a norma TAPPI T222 om-02. A determinação de celulose e hemicelulose seguiu o método Van Soest modificado (SILVA et al., 2009).

4.3 Análise imediata

Para a realização da análise imediata, as amostras de madeira foram submetidas aos procedimentos descritos na norma ASTM D1762. Os teores de umidade, matéria volátil e cinzas foram determinados em triplicata. O teor de carbono fixo nas amostras foi calculado conforme a Equação 9, onde o somatório entre os teores de umidade, matéria volátil e teor de cinzas devem ser subtraídos da massa total, que corresponde a 100%.

$$\text{Carbono fixo (\%)} = 100 - (\text{umidade (\%)} + \text{matéria volátil (\%)} + \text{cinzas (\%)}) \quad (9)$$

4.4 Análise Termogravimétrica

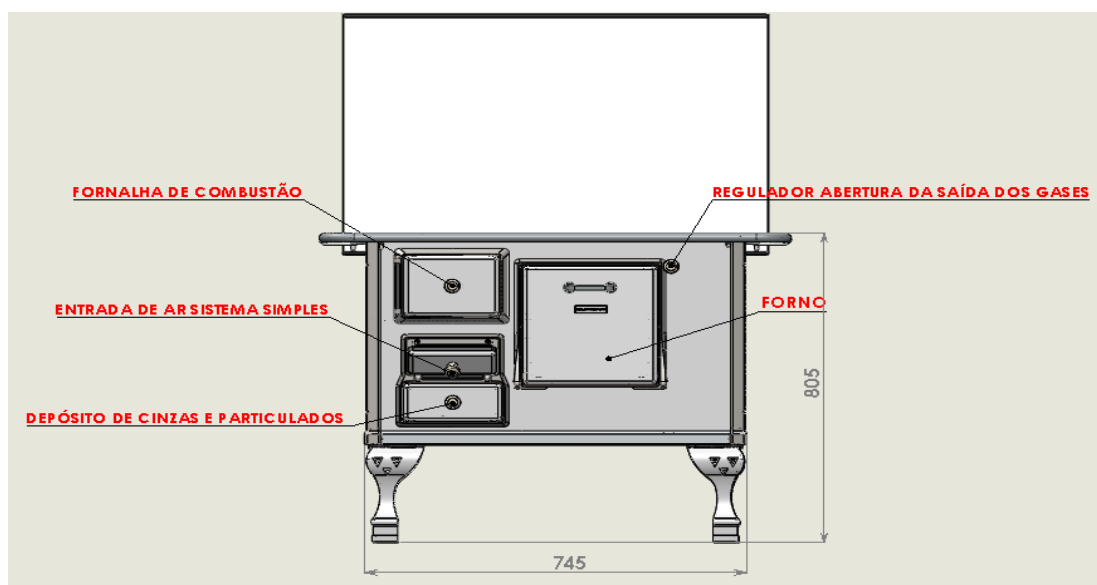
As análises de TGA das amostras de madeira foram realizadas no Laboratório de Polímeros (LPOL/UCS) em equipamento Shimadzu, modelo TGA50, em atmosfera de O₂, a uma vazão de 50 mL/min⁻¹. Aproximadamente 10 mg de amostra na forma de pó (45-65

mesh) foi utilizada em cada ensaio. As análises foram realizadas com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}^{-1}$ com temperatura variando de 25 a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5 Combustão das amostras de madeira

A queima das amostras das madeiras de pinus e eucalipto foi realizada em um fogão à lenha de combustão simples modelo Guindani N°1 e também em um fogão de combustão tripla modelo Vetro, ambos da empresa Guindani Fogões. A Figura 8 ilustra o fogão de combustão simples utilizado.

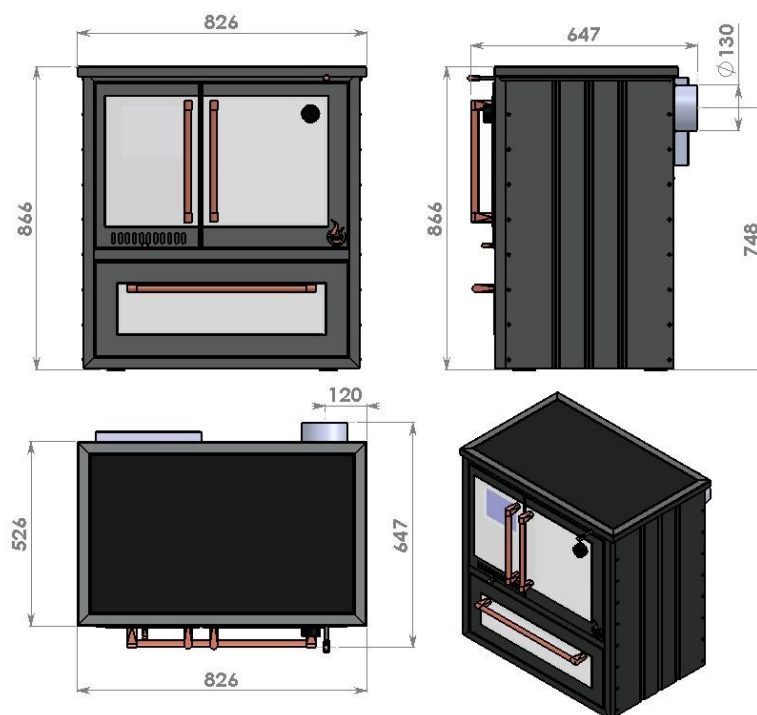
Figura 8: Representação esquemática do fogão à lenha de combustão simples utilizado nos experimentos



Fonte: Guindani Fogões (2021).

A Figura 9 mostra os detalhes e dimensões do fogão de combustão tripla utilizado.

Figura 9: Representação esquemática do fogão à lenha de combustão tripla utilizado nos experimentos



Fonte: Guindani Fogões (2021).

A quantidade de madeira utilizada em cada experimento foi de 1500 g. Para promover o início da combustão foram retirados pequenos cavacos das madeiras utilizadas na queima, mantendo a uniformidade da massa e também não utilizasse um combustível externo na ignição, para não ocorrer possíveis alterações nas análises. Após atear fogo em cada amostra de madeira, em cada um dos fogões avaliados, aguardou-se 30 min antes de realizar as medições, a fim de proporcionar uniformidade da queima da madeira, para posteriormente realizar a determinação da temperatura, umidade e teores de CO e CO₂, expressos em partes por milhão (ppm) e também os teores de TVOCs e HCHO, expressos em mg/m³, dos gases emitidos. As medições foram realizadas em quintuplicata na saída de cada chaminé. O medidor de qualidade do ar da marca Dongguan Jinlide Electronic Technology Company, modelo JD-3002, foi utilizado para medição da temperatura, umidade, ppm CO₂, além dos teores de TVOC e HCHO dos gases gerados. Para quantificação dos teores de CO emitidos utilizou-se um medidor de monóxido de carbono

da marca Next Instruments modelo NCO-01 ambos aparelhos utilizados nas medições têm sua última calibração realizada na data de 23/02/2022.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Componentes da madeira

A composição química das amostras de pinus e eucalipto foi determinada em relação aos teores de extrativos, celulose, hemicelulose, lignina e cinzas em triplicata. Na Tabela 4 são apresentadas as suas respectivas composições químicas, além da comparação com dados existentes na literatura.

Tabela 4: Componentes das madeiras e comparação com dados da literatura

Autor	Biomassa	Umidade (%)	Extrativos (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)
Este estudo	<i>Pinus elliottii</i>	13,16±0,25	10,29±0,73	40,89±1,54	9,47±2,02	25,58±1,51	0,59±0,09
	<i>Eucalyptus grandis</i>	12,00±0,38	8,12±0,70	32,30±1,56	7,03±1,00	39,30±1,34	0,93±0,06
Rowell, 2005	<i>Pinus elliottii</i>	-----	10,30	46,00	11,00	27,00	0,30
Jones, 2006	<i>Pinus taeda</i>	-----	-----	36,17±2,36	23,11±1,43	28,28±1,22	-----
Rowell, 2005	<i>Eucalyptus gigantea</i>	-----	4,80	49,00	14,00	22,00	0,40
Ramírez, 2009	<i>Eucalyptus globulus</i>	-----	1,80±0,30	62,6±1,90	11,9±1,70	26,60±1,00	-----

Fonte: (Autor, 2022).

O teor de umidade em ambas amostras se mostrou elevado. No entanto, alguns estudos apontam que teores de umidade da madeira seca ao ar variam de 13% a 18% (RODOLFO JÚNIOR, 2005). A quantidade de extrativos removidos da madeira depende de diversos fatores, tais como a espécie, a idade e a localização original da amostra de madeira na árvore (SHEBANI et al., 2009). O teor de extrativos, em geral, varia entre 2-5%, mas pode chegar a exceder 15% em espécies oriundas de clima tropical (MÉSZÁROS et al., 2007; GUO et al., 2010).

O maior teor de lignina na amostra de eucalipto indica maior concentração de estruturas aromáticas (OLIVEIRA, 2009) nesta espécie quando comparada a amostra de

pinus. O teor de lignina pode variar entre 25-35% e, devido a sua estrutura complexa, seus componentes tendem a um lento processo de degradação, sendo mais resistentes à altas temperaturas do que as hemiceluloses e a celulose (SHEBANI et al., 2009).

Os teores de celulose e hemicelulose são menores na amostra de eucalipto, possivelmente devido ao maior teor de lignina nesta espécie de madeira. A hemicelulose favorece a degradação térmica da madeira a baixas temperaturas, enquanto a celulose aumenta sua estabilidade térmica devido sua maior massa molar (SHEBANI et al., 2008). Com base no teor de cinzas, a amostra de eucalipto apresenta maior quantidade de material inorgânico em sua constituição.

5.2 Análise imediata das espécies de madeira

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da análise imediata das madeiras estudadas, além da comparação com dados existentes na literatura.

Tabela 5: Análise imediata da madeira em comparação aos dados obtidos da literatura.

Autor	Biomassa	Umidade (%)	Matéria Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Este estudo	<i>Pinus elliottii</i>	13,30±0,10	79,40±0,50	0,80±0,30	6,60±0,20
	<i>Eucalyptus grandis</i>	13,50±0,10	80,60±0,70	0,20±0,04	5,70±0,70
Borghetti, 2022	<i>Pinus elliottii</i>	5,25	82,17	1,01	16,82
Kumar, 2010	<i>Eucalyptus globulus</i>	5,00	89,00	0,80	5,20
Guerrero, 2005	<i>Eucalyptus globulus</i>	7,70	74,90	0,98	16,40

Fonte: (Autor, 2022).

Os teores de umidade obtidos pela análise imediata corroboram aqueles obtidos na análise de composição química da madeira. Como discutido na seção anterior, os teores de umidade da madeira seca ao ar podem variar entre 13% e 18%, dependendo do ponto de equilíbrio obtido com a umidade relativa do ar ambiente de secagem (RODOLFO JÚNIOR, 2005). O elevado teor de matéria volátil é típico das biomassas, como pode-se observar nos valores obtidos por outros autores e apresentados na Tabela 5.

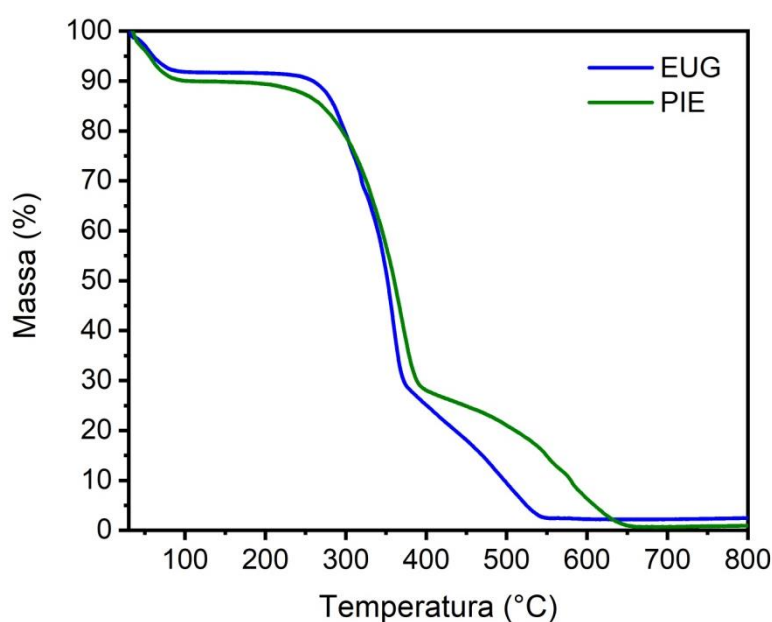
De maneira geral, os teores de cinzas obtidos na análise imediata também são semelhantes aqueles observados na composição química da madeira. As diferenças

podem estar associadas a variações nos procedimentos para determinação do teor de cinzas. A norma TAPPI T 211 om-02, usada para a determinação da composição química da madeira, utiliza uma temperatura de $575 \pm 25^\circ\text{C}$ durante 3 h para a determinação das cinzas, enquanto na ASTM D 1762 utilizada na análise imediata, o teor de cinzas é determinado em ensaio conduzido a 750°C ao longo de 6 h. O teor de carbono fixo para a amostra de pinus foi levemente superior aquele obtido para a amostra de eucalipto.

5.3 Análise termogravimétrica das espécies de madeira

A Figura 10 mostra as curvas termogravimétricas obtidas para as duas amostras de madeira em atmosfera oxidante.

Figura 10: Curvas termogravimétricas das amostras de madeira estudadas



Fonte: Autor 2022.

Ambas as curvas apresentam valores de perda de massa em temperaturas abaixo de 100°C . Este comportamento pode estar relacionado com a perda de água acumulada no interior da madeira, bem como a volatilização dos extrativos. POPESCU et al. (2011) determinaram valores de perda de umidade até 140°C , onde todas as espécies de madeira apresentaram diferentes percentuais de perda de massa por eliminação de água e de extrativos. Durante o processo de decomposição térmica da madeira, moléculas de baixa massa molecular sofrem degradação liberando, entre outros gases, CO_2 e vapor de água

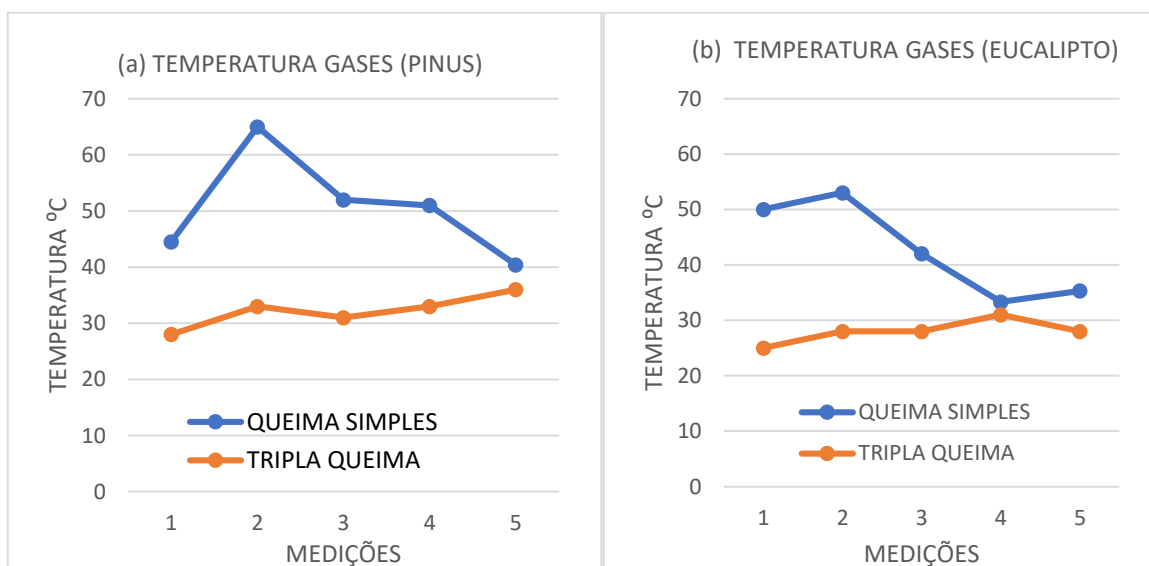
a temperaturas que podem variar entre 30 e 150°C (SHEBANI et al., 2008; SHEBANI et al., 2009; POPESCU et al., 2011).

As espécies de madeira apresentam 3 estágios de perda de massa, como pode-se observar na Figura 10. O primeiro estágio, como discutido no parágrafo anterior, trata-se da perda de umidade e da volatilização dos extrativos e ocorre até aproximadamente 100°C. O segundo pode estar relacionado à decomposição da hemicelulose e da celulose presente nas madeiras, como também a lenta degradação da lignina, iniciando em aproximadamente 220°C e estendendo-se até 400°C. O último estágio inicia em 400°C e estende-se até 550°C para amostra de eucalipto e 650°C para a amostra de pinus. Nesta etapa pode ocorrer a maior degradação da lignina e dos compostos aromáticos formados durante a degradação das espécies de madeira avaliadas (POPESCU et al., 2011).

5.4 Avaliação dos gases gerados durante a combustão

Na Figura 11 estão apresentados os dados de temperatura dos gases na saída da chaminé para as duas espécies de madeira avaliadas nos dois tipos de fornos estudados.

Figura 11: Temperatura dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



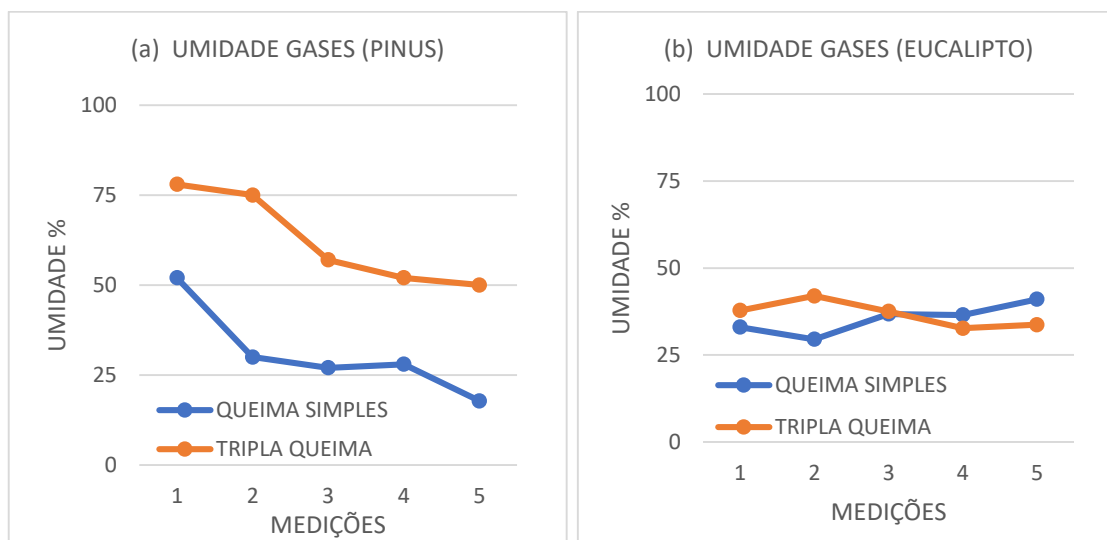
Fonte: Autor 2022.

Observa-se na Figura 11 que os gases na saída da chaminé no forno de queima simples estavam mais aquecidos que aqueles oriundos da queima tripla para ambas as amostras avaliadas.

Possivelmente a queima tripla possibilita uma queima adicional dos gases de combustão e desta forma aumenta a troca de calor no ambiente interno do forno e assim, os gases deixam a fornalha mais frios.

Na Figura 12 estão evidenciados os dados de umidade dos gases na saída da chaminé para as duas espécies de madeira avaliadas nos dois tipos de fornos estudados.

Figura 12: Umidade dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



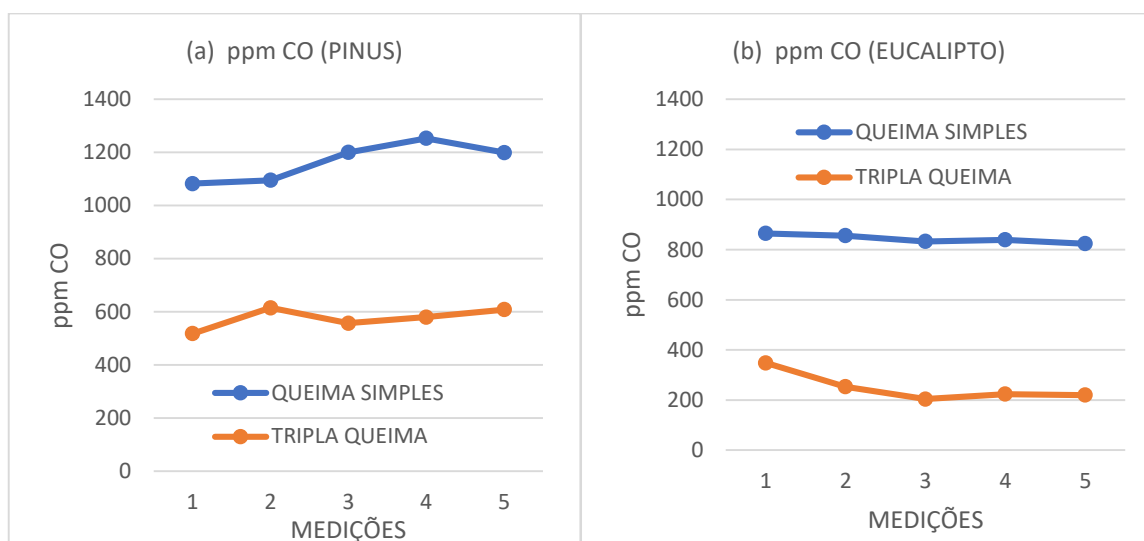
Fonte: Autor 2022.

De acordo com dados analisados é possível observar que na maior parte das medições realizadas, a umidade se manteve mais elevada no forno que realizava a queima tripla. Nos testes realizados com a madeira de eucalipto pode-se observar que os gases gerados apresentaram um menor teor de umidade, em relação a amostra de pinus. Possivelmente este resultado deve-se a diferenças na composição química desta espécie de madeira, conforme discutido nas seções anteriores.

Cardoso et al. (2010), observou que realizando a combustão prévia do gás, resulta em aumento de sua eficiência reduzindo a emissões de gases como CO, porém, essa redução tem como consequência aumentar a emissão de outros parâmetros, como H₂O, que possivelmente esse resultado está associado ao aumento da umidade observado no sistema de tripla queima.

Na Figura 13 estão evidenciados os teores de CO dos gases na saída da chaminé nos dois tipos de fornos estudados para as duas espécies de madeira avaliadas.

Figura 13: concentrado de CO dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



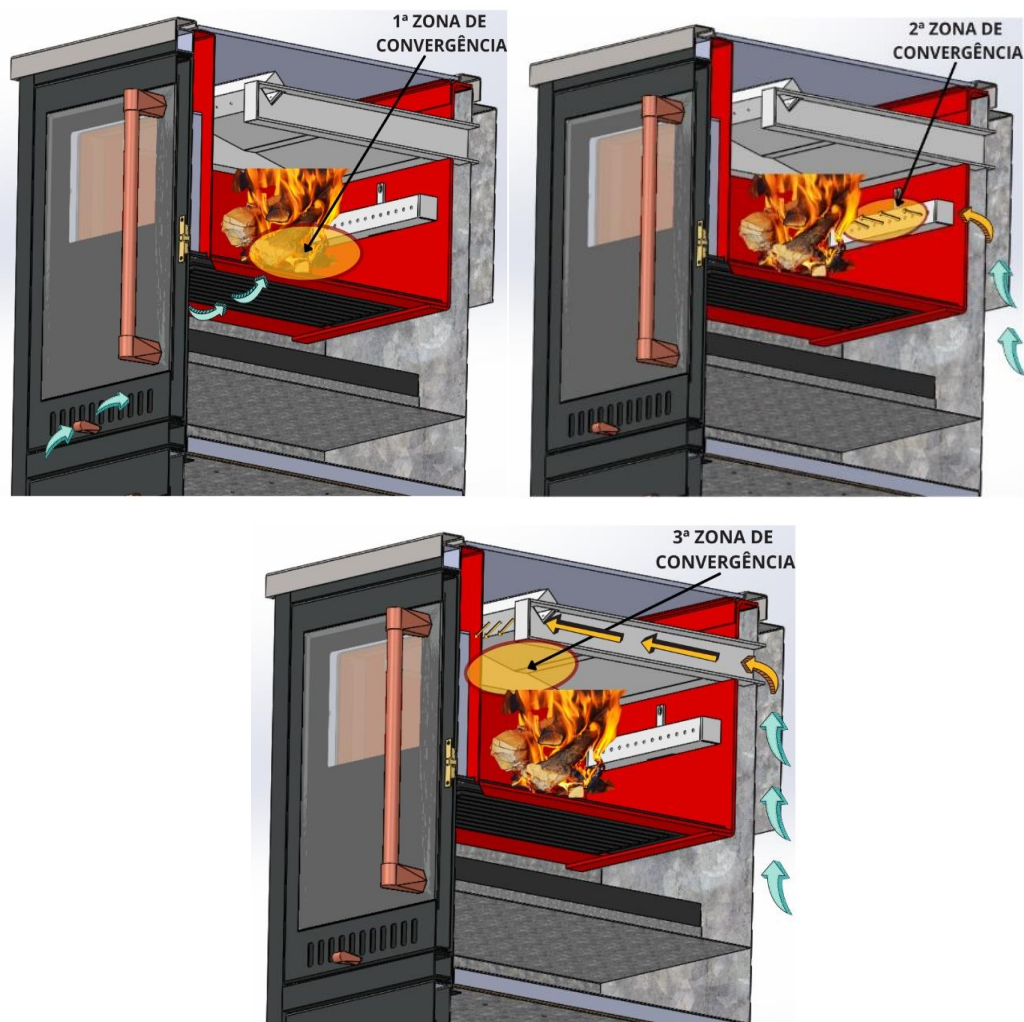
Fonte: Autor 2022.

Conforme pode-se observar na Figura 13, para as duas espécies de madeira estudadas, ocorreu uma redução na emissão de CO durante a queima no forno de tripla combustão. Essa redução foi de aproximadamente 102% com a madeira de pinus e 240% utilizando a madeira de eucalipto. Essa redução expressiva contribui para reduzir as emissões de CO para o ambiente, uma vez que o monóxido de carbono é prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente.

Possivelmente esta redução da emissão de CO está associada ao sistema de tripla queima, onde os gases provenientes da combustão são submetidos a um retardamento de saída e posteriormente adicionado uma mistura de oxigênio, para que ocorra a combustão de forma plena de gases com potencial de combustão. Na Figura 14 pode-se observar o processo de tripla queima onde também é demonstrado o princípio e sequência de funcionamento do sistema.

Cardoso et al. (2010) observou uma redução significativa nas concentrações de monóxido de carbono emitidos quando também procedeu a queima dos gases gerados durante a combustão em uma fornalha evidenciando, com isso, que a maior parte desse gás foi convertida e liberada na forma de CO₂.

Figura 14: Processo de combustão tripla mostrando as zonas de convergência e (a) entrada primária de ar, (b) entrada secundária de ar e (c) entrada adicional (terciária) de ar



Fonte: Guindani Fogões (2021).

De acordo com a Figura 14 é possível visualizar a sequência de combustão em três etapas distintas, onde a primeira combustão ocorre da mesma forma que é realizada em fornos de queima simples, onde basicamente o ar primário entra pela parte frontal do equipamento, em temperatura ambiente, sendo inserido abaixo da biomassa.

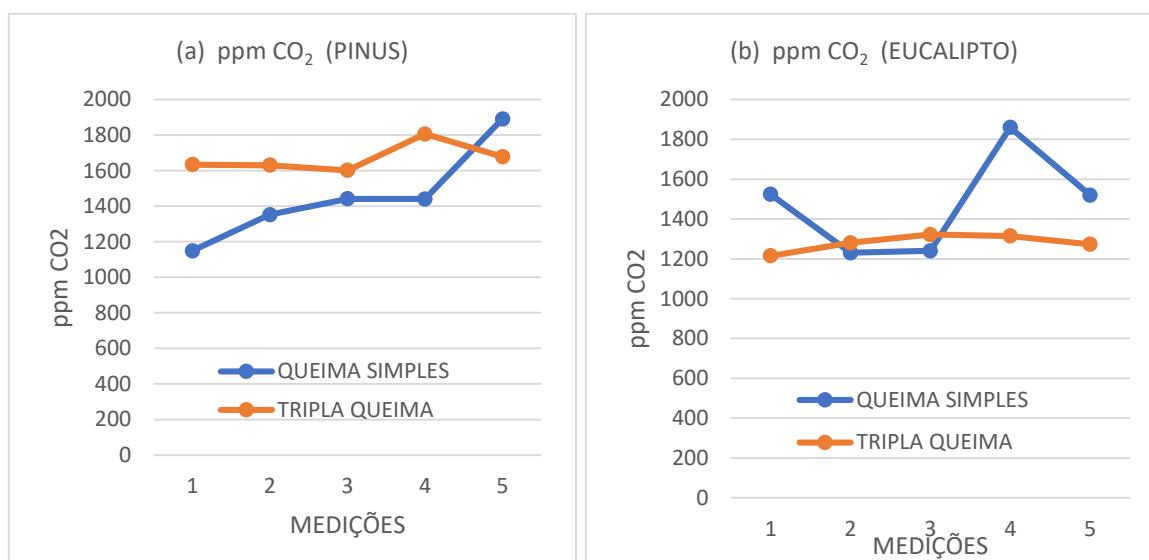
A segunda inserção nesse sistema ocorre atrás do equipamento, sendo aplicado o ar em temperatura mais elevada em relação a primeira, onde basicamente o ar é seccionado por meio de um tubo, utilizando a diferença de pressão entre o meio externo e o interior do equipamento para inserir o oxigênio.

Na terceira onda o ar é inserido também por trás do equipamento, porém como o tubo é mais longo, ele passa acima da queima, assim elevando sua temperatura tornando a

temperatura do oxigênio mais elevada em relação as demais fases de queima. Essas três etapas resultam em potencialização da combustão possivelmente aumentando o aproveitamento energético.

Na Figura 15 estão evidenciados os teores de CO₂ dos gases na saída da chaminé para os dois fornos avaliados em relação as duas espécies de madeira estudadas.

Figura 15: concentrado de CO₂ dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



Fonte: Autor 2022.

De acordo com dados obtidos, é possível verificar que durante a queima da madeira de pinus o teor de CO₂ encontrado no sistema de tripla queima é mais elevado na maior parte das medições realizadas, para a queima de eucalipto pode-se observar um valor mais constante e menor no sistema de tripla queima, quando comparado quando comparado ao de queima simples.

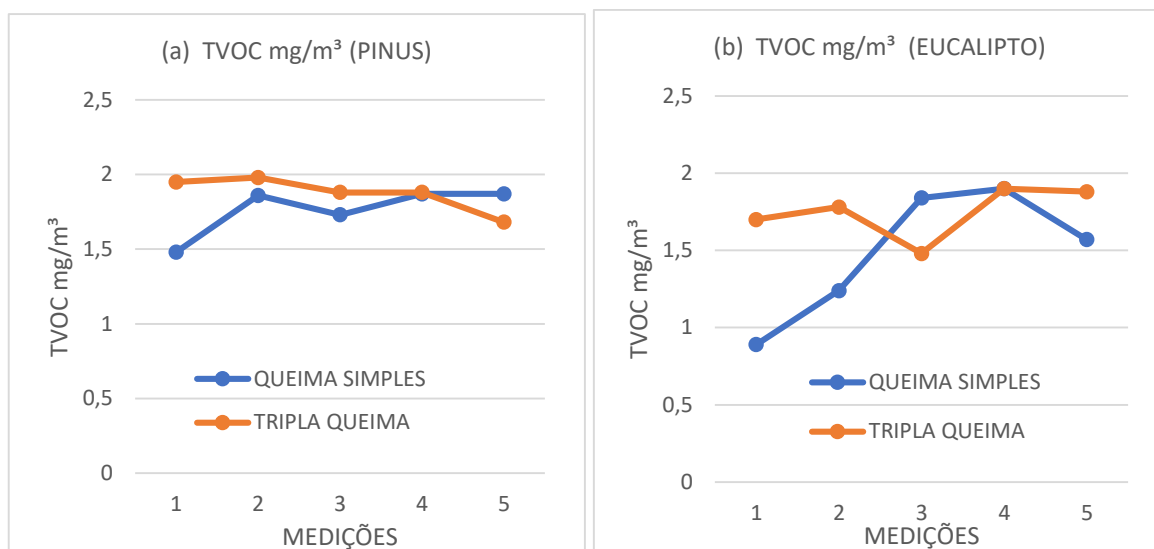
O fato de algumas medições de CO₂ estarem mais elevadas no sistema de tripla queima pode estar relacionado a queima posterior de gases. Possivelmente monóxido de carbono pode ser convertido em dióxido de carbono atingindo uma combustão próxima da combustão completa dos gases gerados, o que corrobora com a redução da emissão de monóxido de carbono observada na Figura 13.

Cardoso et al (2010) também observou em seu estudo que houve redução significativa do monóxido de carbono (CO), quando realizado a oxidação previa do gás,

sendo assim, como consequência essa oxidação poderá gerar um aumento de emissão de CO₂ e energia.

Na Figura 16 estão evidenciados os teores de compostos orgânicos voláteis totais dos gases na saída da chaminé.

Figura 16: TVOC dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



Fonte: Autor 2022.

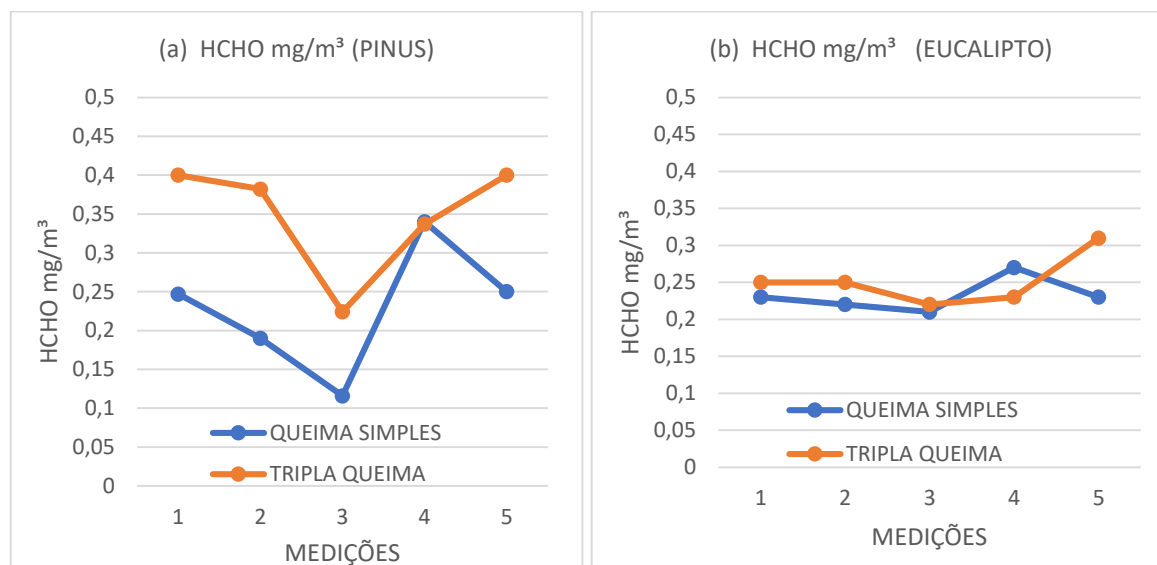
Conforme dados obtidos experimentalmente, pode-se observar na Figura 16 que os teores de TVOC são similares nos dois sistemas, cerca de 1% maior no sistema tripla queima para amostra de pinus e 13% mais elevado no sistema tripla queima para eucalipto conforme medições realizadas. De maneira geral, o sistema de tripla queima apresentou concentrações de TVOC superiores aqueles obtidos no sistema de queima simples, o que de certa forma não era um resultado esperado, dado o processo de combustão tripla. Além de possíveis erros experimentais, os compostos orgânicos voláteis são substâncias que evaporam facilmente, mesmo em baixas temperaturas e desta forma poderiam estar saindo do sistema pelo duto de saída, ou seja, pela chaminé.

Devido à complexidade dos VOCs tanto os efeitos individuais para a saúde ao organismo humano bem como as suas intensidades podem divergir e, às vezes, apresentar diferenças significativas (Trotec GmbH, 2022).

Em espaços interiores destinados a uma presença mais prolongada de pessoas, não deve ser excedido continuamente o valor de TVOC na área de 1 até 3 mg/m³ (Trotec GmbH, 2022).

Na Figura 17 estão evidenciados os teores de formaldeído dos gases na saída da chaminé.

Figura 17: HCHO dos gases para as amostras de pinus (a) e eucalipto (b).



Fonte: Autor 2022.

De forma geral, a concentração de formaldeído foi superior no sistema de combustão tripla, quando comparada ao sistema de combustão simples. De forma geral, esse também não era um resultado esperado, pois o formaldeído poderia estar sendo consumido no forno de combustão tripla.

O formaldeído é um gás incolor nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), apresenta odor irritante e elevada solubilidade em água, sendo também solúvel na maior parte dos solventes orgânicos mais corriqueiros, o que pode ser explicado devido à sua polaridade (RUSSELL, 1994).

Conforme mostrado na Figura 12, o teor de umidade dos gases oriundos da queima tripla é superior ao obtido para a queima simples.

6 CONCLUSÃO

O trabalho realizado teve como objetivo principal comparar o efeito da combustão simples e da combustão tripla em fogões à lenha industriais utilizando madeiras de pinus e eucalipto avaliando a emissão de gases poluentes. A temperatura e umidade dos gases gerados durante a combustão nos dois sistemas estudados também foram avaliadas. Por meio dos experimentos realizados foi possível verificar que a temperatura dos gases emitidos pela chaminé no sistema de combustão tripla é menor que aquela dos gases emitidos no sistema de combustão simples, possivelmente em virtude do reaproveitamento e requeima dos gases no sistema de tripla combustão. No entanto, a umidade dos gases gerados no sistema de queima tripla é maior que a observada no sistema de queima simples.

Houve uma redução no teor de CO emitido entre os dois fornos analisados para as duas espécies de madeira avaliadas. Essa redução foi de aproximadamente 102% com a madeira de pinus e 240% utilizando a madeira de eucalipto. Mas conseqüentemente, houve um aumento de emissões de CO₂, o que pode estar diretamente relacionado a queima mais eficiente do carbono no sistema de tripla queima. O sistema de tripla queima apresentou concentrações de TVOC e HCHO superiores aqueles obtidos no sistema de queima simples. De fato, esse resultado não era esperado, visto que o sistema de tripla queima, em teoria, proporcionaria maior queima dos gases. Porém, tanto o TVOC e HCHO são compostos por gases muito voláteis e que podem não ficar aprisionados na segunda câmara de combustão do forno de tripla queima sendo expelidos pela chaminé.

Os resultados das análises foram satisfatórios em sua maioria, demonstrando que o sistema tripla queima tem uma boa usabilidade quanto sua aplicação, porém analisando alguns parâmetros pode-se perceber, que o sistema tripla queima ainda teria potencial para alguns ajustes para que possa reduzir a níveis ainda menores de emissão de gases nocivos como o TVOC e HCHO.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar as medições na parte interna da chaminé utilizando um multianalisador de gases com auxílio de uma sonda, onde se utilizaria um equipamento do tipo vareta, como esse modelo de equipamento utiliza um sensor fixo inserido no interior da chaminé, possivelmente resultaria em medidas mais uniformes e precisas.

Determinar os teores de gases nitrogenados, tais como NO e NO₂, emitidos durante a queima. A análise desses parâmetros necessitaria de equipamentos que abrangem mais resoluções.

Avaliar a geração de particulados, emitidos durante a saída dos gases de combustão, a quantificação desses parâmetros determinaria se existe uma possível variação de massa, expelida junto ao gás de saída comparando em relação aos equipamentos analisados.

REFERÊNCIAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), Toxicological Profile for Formaldehyde, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Services, 1999.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Banco de Informações da Geração (BIG), 2015.

ASSOCIAÇÃO CAATINGA. Fogões ecoeficientes: manual de construção, 2009.

Disponível em: <https://www.terrabilis.org.br/ecotecadigital/pdf/fogoes-eco-eficientes-manual-de-construcao.pdf>.

BORGHETTI, M. Avaliação do desempenho do processo de gaseificação com CO₂ de pelletes e madeira de *Pinus elliottii*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, 2022.

BRASIL, CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE), 1990., Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 03/1990.

BUENO, Admar Jorge Machado. ESTUDO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA SUPERFÍCIE DA RADIAÇÃO NOS FORNOS DE PIRÓLISE, 2011.

CARDOSO, M.T.; DAMÁSIO, R.A.P.; CARNEIRO, A.C.O.; JACOVINE, L.A.G.; VITAL, B.R.; BARCELOS, D.C. Construção de um sistema de queima de gases de carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v. 16, p. 115-124, 2010.

CIVIDINI, Marcelo José. **Estudo de um sistema misto de aproveitamento de energia térmica proveniente da combustão de biomassa lenhosa e energia solar para aquecimento de água**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DINIZ, Iuri Sousa. Estudo da influência da umidade no consumo específico do cavaco de madeira para geração de vapor saturado em caldeira de biomassa. 2014. 36 f. Trabalho

de Conclusão de Curso (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

FERNANDES, Thiago; DE SOUZA HACON, Sandra; NOVAIS, Jonathan Willian Zangeski. Mudanças climáticas, poluição do ar e repercussões na saúde humana: Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

FUNDAÇÃO ABRINQ. 2021. Famílias estão cozinhando em fogão a lenha porque não conseguem comprar o botijão de gás. Disponível em: <
<https://www.fadc.org.br/noticias/historia-Lar-Fabiano-de-Cristo>>.

GENOVESE, Alex Leão; UDAETA, Miguel Edgar Morales; GALVAO, Luiz Cláudio Ribeiro. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

GODOY, Irma de. Fogão a lenha: um passatempo agradável, uma rotina perigosa. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 34, p. 637-638, 2008.

GUERRERO, M.; RUIZ, M. P.; ALZUETA, M. U.; BILBAO, R.; MILLERA, A. Pyrolysis of eucalyptus at different heating rates: studies of char characterization and oxidative reactivity. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [S.l.], v. 74, p. 307–314, 2005.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, [S.l.], v. 38, p. 42–46, 2010.

[https://livaquecimento.com.br/materiais/E-Book_Calefator_de_A_a_Z_-_Liv_Aquecimento_\(pt-BR\).pdf](https://livaquecimento.com.br/materiais/E-Book_Calefator_de_A_a_Z_-_Liv_Aquecimento_(pt-BR).pdf)

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). 2021. Disponível em: <
<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/32507-produtos-da-biomassa-representaram-9-da-energia-eletrica-do-pais-em-2018>>.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). World Energy Transitions Outlook 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>>.

Jones, P.D., Schimleck, L.R., Peter, G.F. et al. Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood Sci Technol* 40, 709–720 (2006). DOI:10.1007/s00226-006-0085-6

KRATZ, Dagma; WENDLING, Ivar. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de casca de arroz carbonizada. **Revista Ceres**, v. 63, p. 348-354, 2016.

KUMAR, G.; PANDA, A. K.; SINGH, R. K. Optimization of process for the production of bio-oil from eucalyptus wood. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, [S.l.], v. 38, p. 162–167, 2010.

LICKS, Letícia A.; PIRES, Marçal. Metodologia para o cálculo de emissões de carbono e da eficiência na geração de energia pela combustão do carvão fóssil no Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 331-337, 2010.

MALLICK, D.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. S. Co-gasification of coal/biomass blends in 50 kWe circulating fluidized bed gasifier. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, p. 99-111, 2020.

MBANZE, Aires Afonso et al. Potencial energético de combustíveis florestais em cultivos de *Pinus Elliottii* no Sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 1640-1650, 2018.

MÉSZÁROS, E.; JAKAB, E.; VÁRHEGYI, G. TG/MS, Py-GC/MS and THM-GC/MS study of the decomposition and thermal behavior of extractive components of *Robibia pseudoacacia*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [S.l.], v. 79, p. 61–70, 2007.

MOTA, D. Caracterização físico-química do material particulado emitido por forno de pizzaria: estudo de caso da Pizzaria Achiropizza. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 258-267, 2014.

OLAVE, R.J.; FORBES, E.G.A.; JOHNSTON, C.R.; RELF, J. Particulate and gaseous emissions from different wood fuels during combustion in a small-scale biomass heating system. **Atmospheric Environment**, v. 157, p. 49-58, 2017.

POPESCU, M.-C.; POPESCU, C.-M.; LISA, G.; SAKATA, Y. Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods. *Journal of Molecular Structure*, [S.l.], v. 988, p. 65–72, 2011.

PROTO, A.R.; PALMA, A.; PARIS, E.; PAPANDREA, S.F.; VINCENTI, B.; CARNEVALE, M.; GUERRIERO, E.; BONOFILIO, R.; GALLUCI, F. Assesment of wood chip combustion and emission behavior of different agricultural biomasses. **Fuel**, v. 289, p. 119758, 2021.

Ramírez, M., Rodríguez, J., Balocchi, C., Peredo, M., Elissetche, J.P., Mendonça, R., Valenzuela, S. Chemical Composition and Wood Anatomy of Eucalyptus globulus Clones: Variations and Relationships with Pulpability and Handsheet Properties, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2009, 29:1, 43-58, DOI: 10.1080/02773810802607559

RIO GRANDE DO SUL, 1979. Estado do Rio Grande do Sul, Decreto Estadual nº 1.745/1979.

RODOLFO JÚNIOR, A. Estudo da processabilidade e das propriedades de PVC reforçado com resíduos de Pinus. 2005. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)– Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ROWELL, R. M. (Ed.). *Wood chemistry and wood composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 473 p.

RUSSELL, John B.; *Química Geral vol.2*, São Paulo: Pearson Education do Brasil, Makron Books, 1994.

SCHURHAUS, P. Produtos e propriedades térmicas da madeira. **Centro Universitário de União da Vitória**, v. 1. P. 1-162, 2007.

SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – GO, Níveis de qualidade do ar: manual, 2009.

SHEBANI, A. N.; REENEN, A. J. van; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*, [S.l.], v. 471, p. 43–50, 2008.

SHEBANI, A. N.; REENEN, A. J. van; MEINCKEN, M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood – LLDPE composites. *Thermochimica Acta*, [S.l.], v. 481, p. 52–56, 2009.

SMARTFIRE, 2022. Disponível em: <https://www.smartfire.pt/tripla-combustao-como-funciona/>.

SILVA, C.M.S.D.; CARNEIRO, A.C.O.; VITAL, B.R.; FIGUEIRÓ, C.G.; FIALHO, L.F.; MAGALHÃES, M.A.; CARVALHO, A.G.; CÂNDIDO, W.L. Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p. 2426-2432, 2018.

Silva, Celso Luiz da Tratamento térmico de resíduos sólidos. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2001.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2009.

Silva, Jadir N., Cardoso Sobrinho, José e Saiki, Emílio T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. Engenharia Agrícola [online], 2004.

SMITH, D. C. The generation and utilization of residuals from composite panel products. **Forest Products Journal**, v. 54, n.2, p. 8-17, 2004.

URNS, Stephen R. **Introdução à Combustão-: Conceitos e Aplicações**. AMGH Editora, 2013.

VICENTE, E.D.; VICENTE, A.; EVTYUGINA, M.; CARVALHO, R.; TARELHO, L.A.C.; ODUBER, F.I.; ALVES, C. Particulate and gaseous emissions from charcoal combustion in barbecue grills. **Fuel Processing Technology**, v. 176, p. 296-306, 2018.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. 1st.ed. Curitiba: UFPR, 2001.