MILENA MARIA VAN DER NEUT DE ALMEIDA

# PROTÓTIPO DE UM FOGÃO À LENHA COMO ALTERNATIVA AOS MODELOS TRADICIONAIS MENOS EFICIENTES

MESTRADO EM BIOENERGIA

GUARAPUAVA-PR

2017

**MILENA MARIA VAN DER NEUT DE ALMEIDA**

# PROTÓTIPO DE UM FOGÃO À LENHA COMO ALTERNATIVA AOS MODELOS TRADICIONAIS MENOS EFICIENTES

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, na área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof.ª Dr.ª Gilmara de Oliveira Machado

Orientadora

Prof. Dr. Éverson do Prado Banczek

Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2017

Catalogação na Publicação
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

A447p

Almeida, Milena Maria Van Der Neut de
Protótipo de um fogão a lenha como alternativa aos modelos menos eficientes / Milena Maria Van Der Neut de Almeida. – – Guarapuava, 2017
xiv, 67 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, 2017

Orientadora: Gilmara de Oliveira Machado
Coorientador: Éverson do Prado Banczek
Banca examinadora: Gilmara de Oliveira Machado, Andrea Nogueira Dias, Pedro Daniel da Cunha Kemerich

Bibliografia

1. Bioenergia. 2. Biocombustíveis. 3. Combustão da lenha. 4. Emissão do monóxido de carbono. 5. Fogão aprimorado. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.

CDD 660

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**MILENA MARIA VAN DER NEUT DE ALMEIDA**

"PROTÓTIPO DE UM FOGÃO À LENHA COMO ALTERNATIVA AOS MODELOS TRADICIONAIS MENOS EFICIENTES"

Dissertação aprovada em 21/08/2017 como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof.ª Dr.ª Gilmara de Oliveira Machado, UNICENTRO
(Presidente)

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich UNIPAMPA
(Membro)

Prof.ª Dr.ª Andrea Nogueira Dias, UNICENTRO
(Membro)

Guarapuava-PR
2017

**MILENA MARIA VAN DER NEUT DE ALMEIDA**

# PROTÓTIPO DE UM FOGÃO À LENHA COMO ALTERNATIVA AOS MODELOS TRADICIONAIS MENOS EFICIENTES

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, na área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 21 de agosto de 2017.

Prof.ª. Dr.ª Andrea Nogueira Dias – UNICENTRO

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich – UNIPAMPA

Prof.ª Dr.ª Gilmara de Oliveira Machado
Orientadora

GUARAPUAVA-PR
2017

## *Dedicatória*

Dedico aos meus pais, Luís
Fernando Zanon de Almeida
e Eliane Van Der Neut

# AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou meu caminho durante esta caminhada, me dando força e coragem para seguir até o final.

A minha orientadora Prof.ª Dr.ª Gilmara de Oliveira Machado, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação, pelo convívio, apoio, compreensão e amizade construída durante o período o qual realizei a dissertação.

Ao Prof. Dr. Éverson do Prado Banczek, por sua co-orientação e pela construção do fogão utilizado neste estudo.

Ao pesquisador da Embrapa Floresta, Washignton Luiz Esteves Magalhães, pela contribuição e disponibilidade da infraestrutura.

A Equipe técnica da Embrapa, principalmente a Tielidy A. de Moraes Lima e ao Fabrício Augusto Hansel os quais me auxiliaram na execução de medidas apresentadas nesta dissertação e no manuseio de equipamentos.

Ao meu amigo Evandro Teleginski que elaborou os croquis do meu fogão e sempre esteve disposto a me ajudar.

Aos meus pais Luís Fernando Zanon de Almeida e Eliane Van Der Neut, aos meus irmãos Maria Fernanda e Gabriel Van Der Neut de Almeida, ao meu namorado Lucas Stiegler Valtrin, que com muito amor, carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida e a toda a minha família que sempre esteve do meu lado.

Aos meus amigos Tânia Vieira de Mello, Franciel Ignachewski e Alison Margraf por terem me ajudado na coleta do material utilizado neste estudo a Tânia em especial por me escutar e sempre estar ao meu lado e a todos os meus amigos que de alguma forma contribuíram com o trabalho, pelo incentivo e apoio constante, pelos momentos partilhados e palavras de conforto que motivam a seguir em frente. Aos caros colegas do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais, pela troca de conhecimento e pelo companheirismo durante todo o processo de construção dessa dissertação.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, e também para a minha formação acadêmica.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... iv
LISTA DE EXPRESSÕES ..... vii
RESUMO ..... ix
ABSTRACT ..... x
1. INTRODUÇÃO ..... 1
2. OBJETIVOS ..... 7
3. METODOLOGIA ..... 8
3.1 Fonte de dados ..... 8
3.2 Construção do fogão ..... 8
3.3 Caracterizações da lenha ..... 11
3.3.1 Material experimental ..... 11
3.3.2 Determinação do teor de umidade de equilíbrio e teor de umidade máxima ..... 11
3.1.3 Determinação da densidade e do volume ..... 12
3.3.4 Determinação da porosidade ..... 13
3.3.5 Poder calorífico ..... 14
3.3.6 Análise Imediata da lenha ..... 15
3.3.7 Análise Elementar e Equação de combustão incompleta ..... 16
3.3.8 Fator de emissão e estimativa da concentração e exposição ao CO ..... 21
3.3.9 Composição química da lenha ..... 22
3.4 Determinação da eficiência do fogão à lenha ..... 24
3.5 Espectrometria de Massas (EM) ..... 27
3.6 Análise termogravimétrica e calorimétrica ..... 27
3.7 Estatística básica ..... 27
3.8 Análise de Variância e Teste de comparação de médias ..... 28
3.9 Comparação de média com valor fixo ..... 29
3.10 Ajuste de modelos ..... 29
3.11 Avaliação dos modelos ..... 30
3.12 Matriz de correlação ..... 31
3.13 Teste de identidade L&O ..... 31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 33
4.1 Eficiência do Fogão à Lenha em Relação ao Consumo de Lenha e Potência ..... 33

4.2 Propriedades físicas da lenha: Porosidade, densidade básica e aparente e teor de umidade de equilíbrio. ..... 37
4.3 Análise da composição química (teor de lignina, holocelulose, extrativos e cinzas) da lenha e energética (Poder calorífico). ..... 41
4.4 Análise imediata (teor de carbono fixo, teor de voláteis e teor de cinzas) da lenha e energética (Poder calorífico) ..... 46
4.5 Composição elementar e imediata do combustível lignocelulósico ..... 50
4.6 Teor de gases (CO, $CO_2$ e $SO_2$) da equação de combustão incompleta, modelagem do consumo de lenha (F) e eficiência (Ef) em função do teor dos gases CO e $CO_2$ e concentração de CO em uma cozinha hipotética. ..... 58
5. CONCLUSÃO ..... 82
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 83

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1** - Tendência do consumo de lenha residencial do Brasil. ..... 2
**Figura 2** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé curta (Figura 2b) e foto do fogão (Figura 2a). ..... 9
**Figura 3** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada (Figura 3a) e fogão tradicional (Figura 3b). ..... 9
**Figura 4** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada em diferentes ângulos de exposição. ..... 10
**Figura 5** – Combustível consumido pelo fogão à lenha (Figura 5a e 5b). ..... 11
**Figura 6** - Distribuição dos resíduos em função dos valores estimados da Eficiência. ..... 35
**Figura 7** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do consumo de lenha. ..... 41
**Figura 8** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais de PCS. ..... 45
**Figura 9** – Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais de PCS. ..... 49
**Figura 10** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de oxigênio. ..... 56
**Figura 11** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de carbono. ..... 56
**Figura 12** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio. ..... 58
**Figura 13** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio ..... 63
**Figura 14** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do consumo de lenha. ..... 63
**Figura 15** – Gráfico da distribuição da [CO] máximo e médio das diferentes espécies. ..... 65
**Figura 16** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio ..... 65
**Figura 17** - Espectro de massa dos compostos presentes na combustão incompleta da lenha. ..... 67
**Figura 18** – Espectro de massa dos compostos da combustão incompleta. ..... 69
**Figura 19** – Produção dos gases da combustão incompleta. ..... 74
**Figura 20** – Curvas termogravimétricas da lenha. ..... 79

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Brasil e Regiões: Número de domicílios que utilizam lenha. ..... 2
**Tabela 2** – Relação entre o período e o consumo de lenha. ..... 2
**Tabela 3 -** Dados das espécies incorporadas ao acervo do herbário HUCO. ..... 8
**Tabela 4** – Dados utilizados para o cálculo da porosidade. ..... 14
**Tabela 5** – Fator de conversão da base combustível para a base seca e de trabalho. ..... 17
**Tabela 6 -** Análise Elementar na Base Combustível da lenha .. **Erro! Indicador não definido.**
**Tabela 7** – Análise Elementar na Base Seca ..... **Erro! Indicador não definido.**
**Tabela 8** – Análise Elementar na Base Úmida ..... **Erro! Indicador não definido.**
**Tabela 9** – Equações de combustão incompleta em triplicata para cada espécie. ..... 18
**Tabela 10** – Modelos ajustados. ..... 30
**Tabela 11 -** Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Ef (eficiência), F (consumo de lenha) e P (potência) do fogão aprimorado de chaminé curta. ..... 33
**Tabela 12** – Análise de Variância para o experimento de variáveis independentes. ..... 34
**Tabela 13** – Estatística e coeficiente para a equação da eficiência. ..... 34
**Tabela 14** – Comparação entre a eficiência, consumo de lenha e potência do fogão aprimorado e o fogão à lenha tradicional na queima de *Eucalyptus grandis*. ..... 36
**Tabela 15** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Porosidade, Densidade básica, densidade aparente e umidade de equilíbrio. ..... 38
**Tabela 16** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis: porosidade, densidade básica e teor de umidade. ..... 39
**Tabela 17** – Análise de variância para as variáveis independentes. ..... 39
**Tabela 18** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha. ..... 40
**Tabela 19** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos PCS, ligninas, extrativos e holocelulose. ..... 42
**Tabela 20** – Valores da literatura para lenha proveniente do fuste das árvores de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora* ..... 43
**Tabela 21** – Análise de variância para as variáveis independentes. ..... 44
**Tabela 22** – Estatística e coeficiente para a equação de poder calorífico superior. ..... 44
**Tabela 23** – Teste de identidade ..... 46
**Tabela 24** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do PCS, CF, CZ e TV. ..... 47

**Tabela 25** – Análise de variância para as variáveis independentes. ..... 48
**Tabela 26** – Estatísticas para a equação de poder calorífico superior. ..... 48
**Tabela 27** – Teste de identidade ..... 50
**Tabela 28** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Enxofre na base seca, Nitrogênio na base seca, Teor de voláteis e Carbono fixo. ..... 51
**Tabela 29** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, Enxofre, Nitrogênio, Carbono fixo e Teor de voláteis. ..... 52
**Tabela 30** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Oxigênio, Teor de voláteis e Carbono fixo. ..... 52
**Tabela 31** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Oxigênio... 53
**Tabela 32** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Carbono.... 53
**Tabela 33** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Hidrogênio. ..... 53
**Tabela 34** – Estatísticas para a equação do oxigênio. ..... 54
**Tabela 35** – Estatísticas para a equação do carbono. ..... 55
**Tabela 36** – Estatística e coeficiente para a equação do hidrogênio. ..... 57
**Tabela 37** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Consumo de lenha, Eficiência e volume de CO, $CO_2$ $SO_2$ da combustão incompleta. ..... 59
**Tabela 38** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, Enxofre, Nitrogênio, Carbono fixo e Teor de voláteis. ..... 60
**Tabela 39** – Análise de variância para as variáveis independentes. ..... 60
**Tabela 40** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha em função da eficiência e volume de CO da combustão incompleta. ..... 61
**Tabela 41** – Análise de variância para as variáveis independentes. ..... 61
**Tabela 42** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha em função da eficiência e volume de CO2 da combustão incompleta. ..... 62
**Tabela 43** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da [CO] máxi, [CO] méd e E da cozinha. ..... 64
**Tabela 44** – Comparação entre o fogão à lenha aprimorado e o fogão à lenha tradicional em relação a [CO] na queima de *Eucalyptus grandis*. ..... 66
**Tabela 45** – Localização dos picos característicos do espectro de massas. ..... 73

## LISTA DE EXPRESSÕES

**Expressão 1** – Teor de umidade ..... 11
**Expressão 2** – Umidade máxima ..... 12
**Expressão 3** – Densidade aparente ..... 12
**Expressão 4 –** Densidade básica ..... 13
**Expressão 5 –** Densidade da parede celular ..... 13
**Expressão 6 -** Porosidade ..... 13
**Expressão 7** – Poder Calorífico inferior ..... 14
**Expressão 8** – Poder Calorífico Útil ..... 15
**Expressão 9** – Teor de voláteis ..... 15
**Expressão 10** – Teor de cinzas ..... 16
**Expressão 11** – Carbono fixo ..... 16
**Expressão 12** – Combustão incompleta ..... 17
**Expressão 13** – Densidade do gás ..... 20
**Expressão 14** – Volume do gás ..... 20
**Expressão 15** – Fator de emissão do monóxido de carbono ..... 21
**Expressão 16** – Concentração máxima de monóxido de carbono ..... 21
**Expressão 17** – Concentração média de monóxido de carbono ..... 22
**Expressão 18** – Potencial de exposição ao monóxido de carbono ..... 22
**Expressão 19** – Teor de extrativos ..... 22
**Expressão 20** – Teor de lignina ..... 23
**Expressão 21** – Concentração de lignina solúvel (g/L) ..... 23
**Expressão 22** – Concentração de lignina solúvel (%) ..... 24
**Expressão 23** – Teor de holocelulose ..... 24
**Expressão 24** – Calor absorvido pela água ..... 25
**Expressão 25** – Calor total fornecido pela combustão da lenha ..... 25
**Expressão 26** – Eficiência do fogão ..... 25
**Expressão 27** – Calor perdido nas paredes do fogão e nos gases quentes da chaminé ..... 26
**Expressão 28** – Consumo de lenha ..... 26
**Expressão 29** – Potência do fogão ..... 26
**Expressão 30** – Coeficiente de variação ..... 28

**Expressão 31** - *Outlier* ..... 28
**Expressão 32** – Teste t ..... 29
**Expressão 33** - Resíduo ..... 30
**Expressão 34** – Erro absoluto médio (AAE) ..... 31
**Expressão 35** – BIAS (ABE) ..... 32

# RESUMO

VAN DER NEUT DE ALMEIDA, Milena Maria. **Protótipo de um fogão à lenha como alternativa aos modelos tradicionais menos eficientes,** 2017. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava -PR. 2017.

Esta pesquisa teve como objetivo principal a construção de um fogão à lenha aprimorado, de menor consumo de lenha e com menor potencial de exposição ao gás monóxido de carbono que o fogão tradicional. Utilizou-se como combustível lenha de oito espécies diferentes de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*, totalizando nove espécies. O fogão aprimorado apresenta eficiência de 13%, consumo de lenha de 0,7 kg/h e potência de 0,4 kW; enquanto que para o fogão tradicional, a eficiência energética é de 0,9%, consumo de lenha de 2,6 kg/h e potência de 0,1 kW. Devido a uma maior aeração das cavidades celulares para madeiras de maior porosidade, há um aumento de 2,8 kg/h no consumo de lenha para cada variação de uma unidade na porosidade e; por conseguinte, uma melhor queima do combustível. O potencial energético da lenha, expresso pelo Poder Calorífico Superior (PCS), está relacionado com a composição química e imediata, com proporções percentuais de 48%; 28% e 25% para lignina, extrativos e holocelulose, respectivamente. Relativo à composição imediata, sendo a lignina a principal responsável pela formação do carbono fixo e a holocelulose pela fração de voláteis, observa-se uma participação na estimativa do PCS de 56% de carbono fixo e 45% voláteis. No que se refere ao potencial de exposição ao gás monóxido de carbono pelo usuário do fogão, o fogão aprimorado apresenta um potencial 62% maior que a norma da Organização Mundial da Saúde (OMS) permite (40 h-mg/m³), enquanto que o fogão tradicional é de 550%. Conclui-se assim, que o fogão aprimorado, além de ser mais eficiente e potente, consumindo menor quantidade de lenha no seu funcionamento, também promove uma menor liberação do gás monóxido de carbono.



**Palavras-Chave**: Combustão da lenha, emissão do monóxido de carbono, fogão aprimorado.

## ABSTRACT

VAN DER NEUT DE ALMEIDA, Milena Maria. **Prototype of a cookstove as an alternative to less efficient traditional models** 2017. Dissertation (Master in Bioenergy) - State University of Central West, UNICENTRO. Guarapuava - PR. 2017.

In this research, an improved cookstove was constructed to have a lower consumption of firewood and less potential exposure to carbon monoxide than the traditional cookstove. Eight species of *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora was* used as fuel. The improved cookstove presented 13% efficiency, 0.7 kg/h wood consumption and 0.4 kW calorific power; while the traditional cookstove had 0.9% energy efficiency, 2.6 kg/h wood consumption and 0.1 kW calorific power. Due to better aeration of the cellular cavities in firewoods of higher porosity, 2.8 kg/h in the consumption of firewood increases for each variation of one unit in the porosity and; therefore, a better burning of the fuel occurs. The energy content of firewood, expressed by the Higher Heating Value (HHV), was predicted by the chemical and proximate composition. The chemical composition had an influence in the regression equation coefficient of 48% of lignin, 28% of extractives and 25% of holocellulose. Additionally, about proximate composition, as lignin is the main responsible for the formation of fixed carbon and holocellulose for the volatile matter, it is observed a participation on the HHV estimate of 56% fixed carbon and 45% volatile matter. Referring to the potential exposure of carbon monoxide by the cookstove user, the improved and traditional stove had 62% and 550% respectively higher potential than the World Health Organization (WHO) standard that allows 40 h-mg/m³. In conclusion, the improved stove is more efficient and powerful than the traditional cookstove, also consumes less firewood in its operation and promotes a lower release of carbon monoxide.


**Keywords:** Combustion of firewood, carbon monoxide emission, improved stove.

# 1. INTRODUÇÃO

A participação de energias renováveis na matriz energética mundial e brasileira representa a possibilidade de geração de energia mais limpa, a qual libera menos poluentes prejudiciais ao ecossistema e aos seres vivos. A matriz energética mundial possui pequena participação de energia renovável, dados de 2015 apontam o consumo de 5,5% de biocombustíveis e resíduos, 2,2% de hidroeletricidade e 2,1% de energia geotérmica, solar, eólica, entre outras, sendo que a energia gerada a partir de fontes não renováveis compreendem 36,1% de petróleo, 18% de carvão mineral, 26% de gás natural e 9,8% de energia nuclear (Key World Energy Statistics, 2016). No que se refere à matriz energética brasileira, observa-se uma maior diversificação das fontes energéticas utilizadas, com uma participação de 43,5% de energia renovável; sendo constituída por 17,5% de biomassa da cana, 12,6% hidráulica, 8,0% de lenha e carvão vegetal e 5,4% de lixívia e outras renováveis, logo a participação de energia não renovável temos: 36,5% de petróleo, 12,3% de gás natural, 5,5% de carvão mineral, 1,5% de urânio e 0,7% de outras fontes não renováveis (BEN, 2017).

Com a perspectiva de escassez do petróleo a média e longo prazo, bem como as exigências legais quanto às questões ambientais, adicionado às limitações impostas para a construção de novas hidrelétricas de grande porte no Brasil, fontes alternativas de energia renovável deverão ter maior participação para complementar a tendência de aumento no consumo energético (VALE e RESENDE, 2002). Desta forma, pesquisas vêm sendo realizadas em torno da energia solar, eólica, geotérmica, das marés, nuclear e de biomassa como a lenha proveniente de florestas plantadas (CORTEZ et. al., 2009).

De acordo com o Balanço Energético Nacional, a utilização da lenha nas residências seja para aquecimento residencial em regiões de clima temperado ou para a cocção de alimentos, chega a ficar com uma porcentagem muito próxima ao uso de GLP (gás liquefeito de petróleo) sendo o consumo de lenha de 24,4% e 26,5% de GLP, o que mostra a importância que a lenha ainda tem no Brasil. (BEN, 2017).

Na Tabela 1 observa-se a trajetória do número de domicílios que utilizam lenha como fonte de energia no Brasil e em suas regiões, estimando que o consumo de lenha chegue a cerca de 7,5 milhões unidades em 2024 (EPE, 2016).

**Tabela 1** – Brasil e Regiões: Número de domicílios que utilizam lenha.

| Ano | Norte | Nordeste | Sul | Sudeste | Centro-Oeste | Brasil |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mil Unidades | | | |
| **2015** | 506 | 2768 | 2257 | 1675 | 393 | 7599 |
| **2019** | 509 | 2760 | 2260 | 1669 | 396 | 7594 |
| **2024** | 509 | 2736 | 2257 | 1655 | 399 | 7555 |

**Fonte**: EPE, 2016.

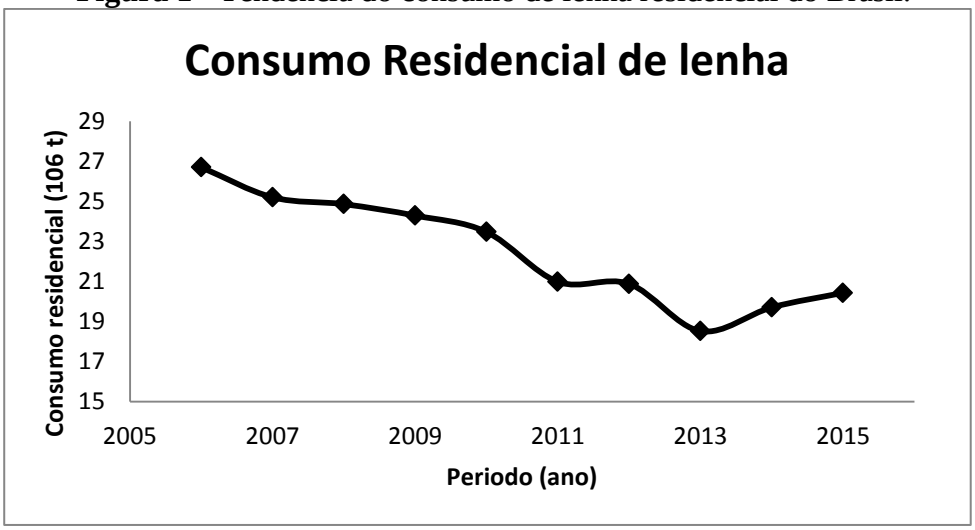
Os valores da Tabela 2 expressam a projeção da demanda do consumo de lenha para o setor residencial nos últimos 10 anos, mostrando uma tendência variável com redução de 2006 a 2013 e aumento do consumo de lenha de 2014 a 2015, os valores da tabela levam em consideração o montante de lenha consumido por domicílio e o percentual de residências com fogão à lenha. A Figura 1 demostra essa tendência do consumo de lenha nas residências.

**Tabela 2** – Relação entre o período e o consumo de lenha.

| **Período (ano)** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| **Consumo Residencial de lenha ($10^6$ t)** | | | | | | | | | |
| 26,697 | 25,2 | 24,86 | 24,287 | 23,471 | 20,984 | 20,879 | 18,521 | 19,705 | 20,431 |

**Fonte**: BEM, 2016

**Figura 1** - Tendência do consumo de lenha residencial do Brasil.




**Fonte**: BEM, 2016

Segundo Ribeiro e Silva (2014), o aumento da utilização de energias renováveis eleva o crescimento econômico do país e diminui a degradação do meio ambiente, assim como desenvolve uma visibilidade expressiva no sistema internacional, fazendo com que melhore a sua competitividade em relação a outros países mais desenvolvidos. O fato de que a energia renovável é usada para sanar e diminuir danos ao meio ambiente é um dos principais motivos pelo qual ela está sendo desenvolvida tão rapidamente.

O Brasil é um país tropical com imensa cobertura vegetal nativa, além de ter um grande potencial agrícola, deste modo à produção de biomassa de origem florestal é significativa, sendo a madeira na sua forma direta como lenha ou do seu derivado o carvão vegetal, ambos amplamente utilizados para finalidade energética.

Mesmo com a industrialização e a introdução de combustíveis fósseis, a lenha e o carvão vegetal produzidos a partir de madeira proveniente de floresta nativa e floresta plantada, continuam sendo fontes importantes de energia nas residências e no setor produtivo, representando 8,2% do total da produção de energia no Brasil; porém, o consumo total de lenha que foi de 6,4% em 2015, teve um aumento de 0,1% em relação ao ano anterior (BEM, 2016), entretanto a sua produção diminui aproximadamente 14% indo de 91.922 mil toneladas em 2006 para 79.094 mil toneladas em 2015. Essa queda não fez com que o consumo de lenha diminuísse e sim promoveu um leve aumento de 1,6% com o passar dos anos, sendo esse aumento no consumo de 52.949 mil toneladas de lenha em 2006 para 53.774 mil toneladas de lenha em 2015 (MME, 2016).

A obtenção dessa lenha pode ocorrer diretamente das florestas nativas ou por meio de plantios energéticos, sendo a floresta nativa a opção mais utilizada nas residências como forma de obtenção do combustível lenhoso. Como consequência dessa retirada da lenha da floresta nativa tem-se o desmatamento principalmente em pequenas propriedades rurais, essa extração pode ser para o próprio consumo ou mesmo para venda como forma de obtenção de renda.

Aproximadamente três bilhões de pessoas no mundo dependem da biomassa de origem vegetal para cocção de alimentos e aquecimento. Aproximadamente 50-60% dessas pessoas utilizam a madeira como fonte de energia, usualmente dentro de casa, com mínima circulação de ar, se submetendo constantemente à exposição de altas concentrações de fumaça originária dos fogões instalados no interior das cozinhas; causando um grande impacto na saúde principalmente de mulheres (NORTHCROSS, et al, 2012).

A fumaça oriunda da queima da lenha contém inúmeros compostos tóxicos, incluindo

monóxido de carbono, dioxinas e furanos, uns dos compostos mais tóxicos conhecidos pela ciência. Os resultados na saúde decorrentes da exposição às dioxinas abrangem problemas reprodutivos e de desenvolvimento, danos ao sistema imunológico e interferência na produção de hormônios, além de causar câncer (NORTHCROSS, et al, 2012).

Importante destacar que a destruição de ecossistemas não ocorre apenas em países como o Brasil, sendo um problema mundial, trazendo o esgotamento dos recursos naturais. Devido ao desmatamento ilegal, as florestas estão reduzindo sua área natural e a utilização de recursos renováveis de maneira sustentável é de suma importância. O uso mais comum dos fogões é para a cocção de alimentos, pela população de menor renda, mas em regiões mais frias também são usados fogões metálicos que adicionalmente atuam no aquecimento domiciliar.

Por ser um recurso mais barato que a utilização de fogões a gás, que necessita do GLP, o consumo de lenha vem aumentando uma vez que a madeira muitas vezes é retirada diretamente das áreas florestais próximas, na própria região, sem custo adicional e sem autorização para tal extração. Existem várias causas para que ocorra o desmatamento, as mais relevantes são a substituição de áreas florestais para a implementação de atividades produtivas tais como a pecuária, a agricultura de monocultivo, a abertura de estradas e a própria extração de madeira como combustível (MARGULIS, 2004).

Segundo Vale et. al. (2000), uma determinada madeira para fins energéticos, deve possuir potencial para produção de biomassa, como espécies dos gêneros *Eucaliptus e Corymbia*, sendo os gêneros mais utilizados para fins energéticos no Brasil, como fonte renovável, provenientes de plantios, possuindo crescimento rápido em relação às espécies nativas, proporcionando mais ciclos de cortes em um mesmo período de tempo e com maior produção de biomassa.

Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* são conhecidos por sua grande variabilidade genética, ocupando 5,6 milhões de hectares da área de árvores plantadas no Brasil, com crescimento de 2,8% ao ano nos últimos cinco anos e produtividade média de 36 $m^3$/ha.ano (IBA, 2016); são caracterizados por possuir espécies de grande capacidade de adaptação às condições ambientais de grande diversidade climática, podendo ser cultivados em altitudes desde a beira mar até regiões de altitudes mais elevada (ANDRADE, 1961).

O gênero *Eucalyptus* compreende mais de seiscentas espécies com propriedades físicas e químicas tão diversas que fazem com que eles sejam usados para as mais diversas finalidades, bem como adaptável aos mais diversos climas. Mesmo dentro de uma mesma

espécie, propriedades como densidade e teor de lignina podem variar marcantemente, fazendo com que determinadas progênies ou procedências sejam mais apropriadas para uso energético (PEREIRA et. al. 2000; PALMA et. al. 2010).

O Censo Demográfico de 2010 registrou que 29.830.007 pessoas vivem em áreas rurais no país, o que representa 15,65% da população brasileira (IBGE, 2010), sendo esta parte da população, juntamente com moradores de cidades do interior, responsáveis pela utilização do fogão à lenha em quase sua totalidade. Considerando um consumo médio anual de dois metros cúbicos de madeira por pessoa, pode-se estimar a existência atual de um contingente de pelo menos trinta milhões de pessoas dependentes da madeira como fonte de energética domiciliar no Brasil. Muito provavelmente, trata-se de pessoas vinculadas às camadas mais pobres da população, as quais possuem dificuldades de acesso a outras fontes energéticas, por razões econômicas ou estruturais. Nesse contexto, pode-se vislumbrar um forte componente de ordem social a ser atendido em relação às políticas públicas, com apelo e ligação com a questão de segurança alimentar no país (BRITO, 2007).

Segundo Rodrigues et. al. (2002), o uso da lenha mostrou estar relacionado a aspectos culturais, uma vez que o fogão a lenha é usado devido ao sabor que ele agrega no alimento e também a fatores econômicos, pois a lenha é mais barata, quando comparada com o uso de eletricidade e GLP.

Os fogões à lenha tradicionais apresentam uma baixa eficiência energética, perdendo energia para o ambiente e com isso aumentando o tempo para a cocção dos alimentos, promovendo assim um aproveitamento incompleto da madeira, e a emissão de gases e partículas poluentes para atmosfera. A baixa eficiência gera um maior consumo de lenha já que o aproveitamento do calor não é completo e a queima ocorre mais rapidamente (BHATTACHARYA, 2002). Os fogões à lenha apresentam uma eficiência, que pode variar de 5% a 30%, dependendo da conversão da energia da lenha em calor, da tecnologia e do tipo de construção realizada (LAU, 2013).

Um aumento na eficiência dos fogões pode ser obtido por meio do isolamento térmico da câmara de combustão. Os isolantes térmicos ajudam a manter o calor no interior do fogão, uma vez que sua condução no isolante não é eficiente, com isso reduzem a perda de energia para o meio externo, fazendo com que haja maior aproveitamento deste calor dentro dos fogões. Entre os materiais mais usados como isolantes térmicos de câmara de combustão estão a lã de vidro e a lã de rocha (SIAS, 2006).

Nos fogões tradicionais, na combustão da lenha, o calor é liberado aleatoriamente

enquanto que no fogão aprimorado tecnologicamente ocorre uma concentração do calor na direção da panela, proporcionando uma economia de lenha. Em síntese, seu princípio de funcionamento é baseado na concentração de calor no interior da câmara de combustão isolada termicamente.

Segundo Still & Winiarski, 2001, os fogões de tecnologia melhorada são baseados em uma combinação de princípios simples; geralmente o design da câmara de combustão é em forma de "L", esta configuração permite criar maior fluxo de ar, proporcionando quantidade de oxigênio suficiente para gerar uma combustão mais limpa, assim, reduzir os níveis de emissões de gases poluentes. O combustível é colocado de forma horizontal na grelha, com queima se iniciando na extremidade, o que contribui também para se obter uma queima mais limpa. Para evitar que a massa de ar frio que ingressa diminua a temperatura no interior da câmara (o que seria prejudicial para uma boa combustão), o ar é forçado a passar sob a grelha e entre a lenha, permitindo seu o aquecimento gradual. Além disso, as paredes da câmara de combustão são isoladas para minimizar as perdas de calor com o meio externo e assim favorecer a transferência de calor por radiação e por convecção. A chaminé deve sempre fazer parte da construção do fogão para que ocorra a canalização e evacuação externa da fumaça proveniente da queima da lenha.

Nesta pesquisa um fogão à lenha aprimorado foi proposto com a finalidade de se obter uma economia no consumo da lenha proveniente de floresta plantada e desta forma um menor impacto na extração de biomassa de florestas nativas, bem como um melhor aproveitamento do calor liberado na queima da lenha para a cocção de alimento.

## 2. OBJETIVOS

Objetivo geral:

Desenvolver um protótipo de fogão à lenha aprimorado visando maior eficiência energética, menor consumo de lenha e de queima mais limpa que os fogões tradicionais.

Objetivos específicos:

1. Avaliar se a porosidade da lenha e a eficiência do fogão afetam o consumo de lenha.
2. Investigar se a composição química e imediata da lenha influenciam no Poder Calorífico Superior.
3. Analisar se o potencial de exposição ao gás monóxido de carbono do fogão aprimorado e tradicional se encontra acima da norma da Organização Mundial da Saúde.

# 3. METODOLOGIA

## 3.1 Fonte de dados

A madeira utilizada foi obtida da área experimental do projeto TUME (Teste de Uso Múltiplo de Eucaliptos), localizada no Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva, na cidade de Irati, Estado do Paraná. Na área em questão se encontram plantadas nove espécies florestais: *Eucalyptus saligna* **Sm**., *Corymbia citriodora* **(Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson**; *Eucalyptus urophylla* **S.T. Blake**; *Eucalyptus grandis* **W. Hill ex Maiden**; *Eucalyptus grandis* **W. Hill ex Maiden** x *Eucalyptus urophylla* **S.T. Blake**; *Eucalyptus propínqua* **H. Deane & Maiden**; *Eucalyptus pellita* **F. Muell**., *Eucalyptus camaldulensis* **Dehnh**. e *Eucalyptus tereticornis* **Sm.** (Tabela 3).

**Tabela 3 -** Dados das espécies incorporadas ao acervo do herbário HUCO.

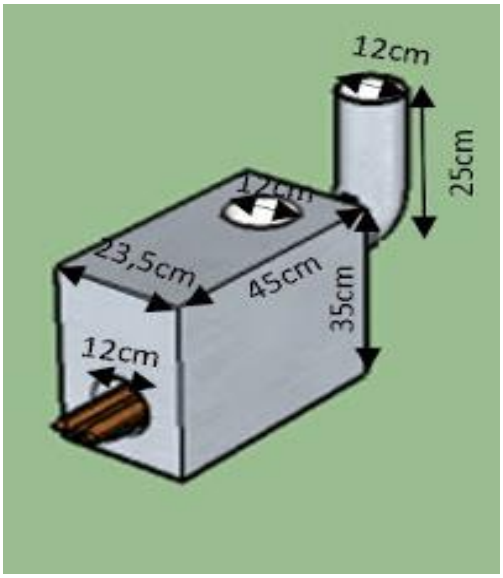
| Nome científico das espécies de *Eucalyptus* | NºR | Coletores | NºA |
|---|---|---|---|
| *Eucalyptus propingua* **H. Deane & Maiden** | HUCO 5860 | Favaro | 61 |
| *Eucalyptus saligna* **Sm.** | HUCO 5857 | Margraf | 129 |
| *Eucalyptus* urograndis (hibrido) | HUCO 5861 | Favaro | 88 |
| *Eucalyptus grandis* **W. Hill ex Maiden** | HUCO 5862 | Favaro | 97 |
| *Corymbia citriodora* **(Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson** | HUCO 5858 | Margraf | 43 |
| *Eucalyptus urophylla* **S. T. Blake** | HUCO 5859 | Margraf | 93 |
| *Eucalyptus pellita* **F. Muell** | HUCO 5863 | Kluger | 54 |
| *Eucalyptus camaldulensis* **Dehnh** | HUCO 5864 | Kluger | 78 |
| *Eucalyptus tereticornis* **Sm.** | HUCO 5865 | Kluger | 89 |

## 3.2 Construção do fogão

O fogão de estudo foi construído com dois recipientes metálicos de forma prismática com faces retangulares, de capacidade de 18 litros cada e com câmara de combustão interna de zinco na forma de “L”. A câmara de combustão foi isolada termicamente com argamassa refratária de sílica, a qual foi moldada no entorno desta câmara e curada sob aquecimento por 24 horas, em um forno à lenha construído no interior do solo. Uma chaminé foi acoplada ao fogão para a canalização dos voláteis, possuindo dimensões de 25 cm de altura e 12 cm de diâmetro; adicionalmente, em experimentos para fins de comparação com o fogão tradicional, alongou-se a chaminé do fogão aprimorado para 120 cm de altura, Figuras 2, 3 e 4. O fogão

tradicional (Figura 3b) é de ferro fundido, com dimensões de 48 cm de altura e 41 cm de largura, apresenta chaminé acoplada de aproximadamente 4 metros de altura e 12 cm de diâmetro. O fogão tradicional tem capacidade para apenas uma panela, não possui isolamento térmico da câmara de combustão e se localiza no interior de uma cozinha residencial.

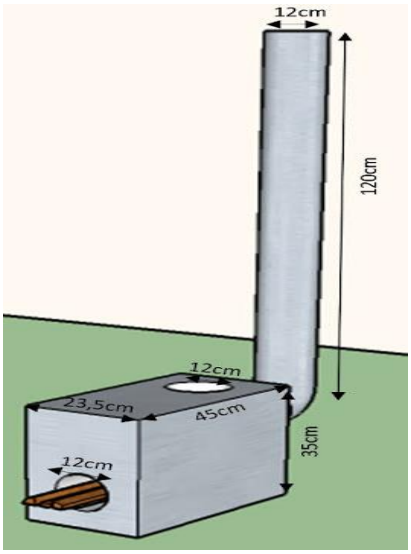
**Figura 2** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé curta (Figura 2b) e foto do fogão (Figura 2a).




(a) (b)

**Fonte:** Evandro Teleginski, 2017 (Figura 2b).

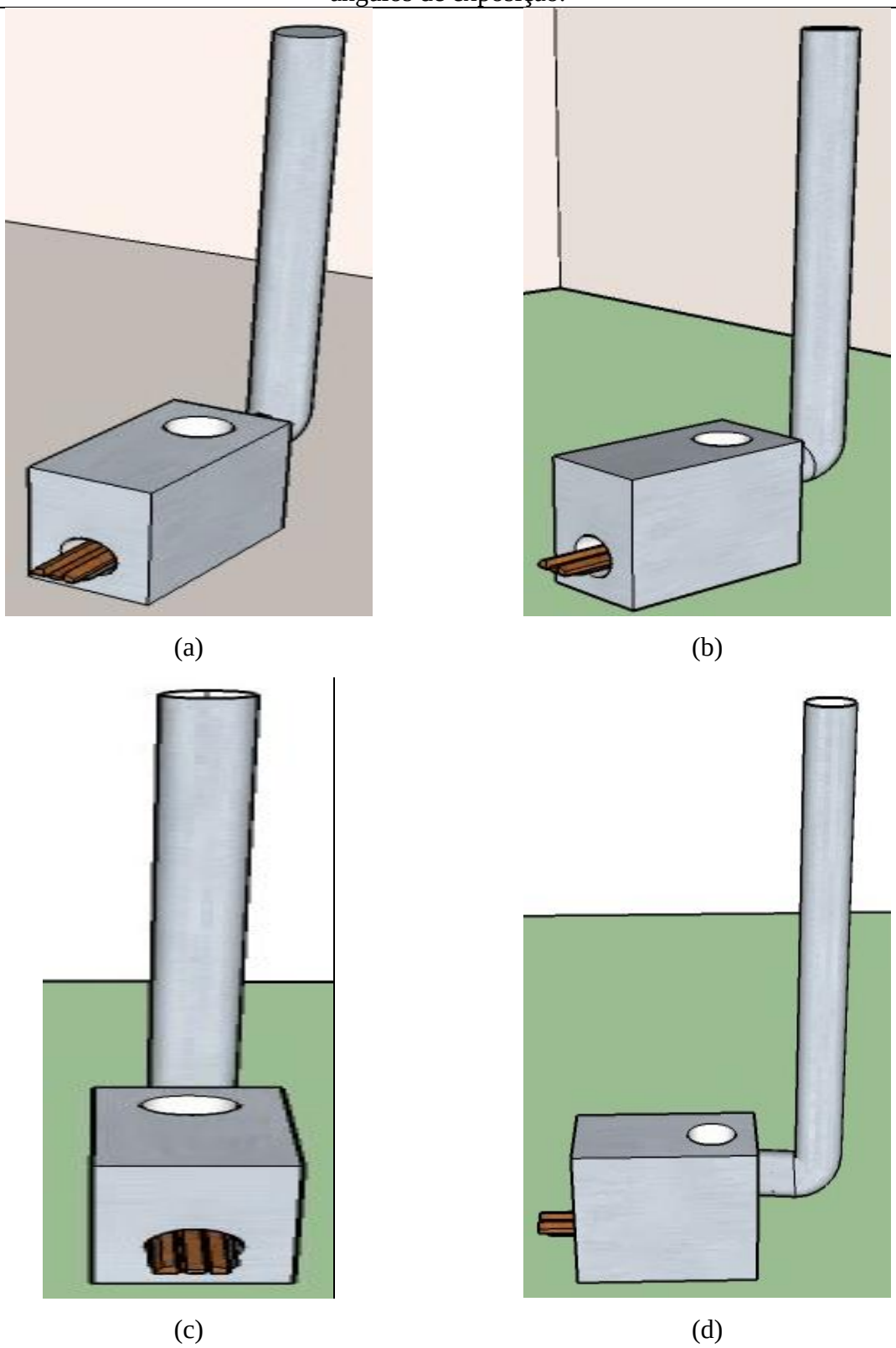
**Figura 3** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada (Figura 3a) e fogão tradicional (Figura 3b).



(a) (b)

**Fonte:** Evandro Teleginski, 2017 (Figura 3a).

**Figura 4** – Protótipo do fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada em diferentes ângulos de exposição.




**Fonte:** Evandro Teleginski, 2017.

### 3.3 Caracterizações da lenha

*3.3.1 Material experimental*

Para o presente estudo foram utilizados galhos das árvores de *Eucalyptus spp.* e *Corymbia citriodora* depositados no solo do plantio, tendo diâmetro na faixa de 0,6 a 3,9 cm e 30 cm de comprimento (Figura 5).

**Figura 5** – Combustível consumido pelo fogão à lenha (Figura 5a e 5b).

(a) (b)

*3.3.2 Determinação do teor de umidade de equilíbrio e teor de umidade máxima*

Para a determinação do teor de umidade da lenha utilizada nos ensaios de combustão do fogão e nas amostras para a determinação da composição imediata foi utilizado o método de secagem em estufa. A estufa foi regulada para 105ºC e a amostra foi considerada seca quando atingiu massa constante (NBR 7190, 1997). A análise foi feita em triplicata, e o teor de umidade determinado pela Expressão 1.

$$U(\%) = \left(\frac{m_i - m_s}{m_i}\right) \times 100 \quad \textbf{(1)}$$

U = Teor de Umidade (%)

$m_i$ = Massa inicial da amostra (g)

$m_s$ = Massa seca da amostra (g)

Na determinação da densidade da parede celular da lenha é necessário o cálculo do teor de umidade máxima ($U_{máx}$%), de acordo com a Expressão 2. A amostra foi submersa em água por um mês até atingir a saturação das fibras e em seguida seca em estufa para determinação da massa seca.

$$U_{máx}(\%) = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s}\right) \times 100 \quad \textbf{(2)}$$

$U_{máx}$ = Umidade máxima (%)

$m_{sat}$ = Massa saturada (g)

$m_s$ = Massa seca da amostra (g)

*3.1.3 Determinação da densidade e do volume*

A amostragem dos lotes de lenha, para a determinação das propriedades físicas, foi realizada por meio da seleção de toretes cortados no comprimento de 5 cm, com diâmetros selecionados de tal forma que fosse representativo do lote. A análise foi realizada com 5 repetições para cada diâmetro médio.

A densidade aparente no teor de umidade de equilíbrio foi determinada por meio da Expressão 3. O volume da lenha foi obtido utilizando-se o método da balança hidrostática, o qual consiste na completa imersão da amostra em um recipiente com água depositado sob uma balança digital; sendo a densidade da água igual a 1 g/cm³, o volume do torete será igual ao valor da massa apresentada no visor da balança. Nas medidas de densidade aparente as faces do torete foram previamente impermeabilizadas com parafina antes da imersão.

$$\rho_{aparente}\ (g/cm^3) = \frac{m_i}{(v_{eq} \times \rho_{H2O})} \quad \textbf{(3)}$$

$P_{aparente}$ = Densidade aparente (g/cm³)

$m_i$ = Massa inicial (g)

$v_{eq}$ = Volume no teor da umidade de equilíbrio (cm³)

$\rho_{H2O}$ = Densidade da água (g/cm³)

Na determinação da densidade básica, os toretes foram previamente colocados para saturação durante um mês, por meio de imersão em água e em seguida o volume foi aferido pelo método da balança hidrostática. As amostras foram secas em estufa de circulação de ar na temperatura de 105 ± 5ºC por uma semana (Expressão 4).

$$\rho_{bas}\ (g/cm^3) = \frac{m_s}{(v_{sat} \times \rho_{H2O})} \quad \textbf{(4)}$$

$\rho_{bas}$ = Densidade básica (g/cm³)

$m_s$ = Massa seca (g)

$v_{sat}$ = Volume saturado (cm³)

$\rho_{H2O}$ = Densidade da água (g/cm³)

Para o cálculo da porosidade utilizou-se a densidade da parede celular sendo determinada pela Expressão 5.

$$\rho_{pc}\ (g/cm^3) = \frac{\rho_{bas}}{(1 - 0{,}01 \times \rho_{bas} \times U_{máx}\%)} \quad \textbf{(5)}$$

$\rho_{pc}$ = Densidade da parede celular (g/cm³)

$\rho_{bas}$ = Densidade básica (g/cm³)

$U_{máx\%}$ = Umidade máxima (%)

*3.3.4 Determinação da porosidade*

Com o resultado das variáveis previamente definidas acima e os dados apresentados na Tabela 4, a porosidade dos toretes foi definida pela Expressão 6 proposta por Perez-Peña (2011):

$$\text{Porosidade}\ (\%) = 1 - \left(\frac{\rho_{bas}}{\rho_{pc}}\right) \times 100 \quad \textbf{(6)}$$

$\rho_{bas}$ = Densidade básica (g/cm³)

$\rho_{pc}$ = Densidade da parede celular (g/cm³)

**Tabela 4** – Dados utilizados para o cálculo da porosidade.

| Espécies | Pbas (g/cm³) | ρparedecelular (g/cm³) | Umidade Máximo % |
|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 0,55±0,02 (3,07) | 1,30±0,10 (8,05) | 105,20±4,77 (4,53) |
| ***E. propínqua*** | 0,55±0,03 (4,97) | 1,30±0,08 (6,18) | 106,23±9,97 (9,39) |
| ***E. pellita*** | 0,53±0,03 (5,66) | 1,12±0,08 (7,58) | 98,35±12,69 (12,90) |
| ***E. tereticornis*** | 0,54±0,05 (8,60) | 1,34±0,19 (13,83) | 111,83±24,11 (21,56) |
| ***E. urophylla*** | 0,54±0,03 (5,45) | 1,27±0,13 (10,29) | 106,62±8,32 (7,80) |
| ***E. camaldulensis*** | 0,55±0,03 (5,91) | 1,37±0,06 (4,03) | 108,52±13,22 (12,18) |
| ***E. urograndis*** | 0,52±0,04 (7,78) | 1,21±0,05 (4,42) | 109,27±13,07 (11,96) |
| ***C. citriodora*** | 0,58±0,03 (5,08) | 1,28±0,16 (12,26) | 93,36±12,30 (13,18) |
| ***E. saligna*** | 0,52±0,03 (5,99) | 1,30±0,14 (10,89) | 116,40±14,14 (12,14) |

*3.3.5 Poder calorífico*

A determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) foi feita por meio de uma bomba calorimétrica adiabática modelo C200, marca IKA.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) da lenha foi estimado pela Expressão 7, com a concentração de hidrogênio na base seca (Tabela 5) determinada por meio de Análise Elementar (PEREIRA et. al., 2016):

$$\mathrm{PCI\ (MJ/kg)} = \frac{\mathrm{PCS} - 600 \times \left(\frac{9 \times \mathrm{H}}{100}\right)}{239} \quad \textbf{(7)}$$

PCI = Poder calorífico inferior (MJ/kg)

PCS = Poder calorífico superior (MJ/kg)

H = Teor de Hidrogênio na base seca (%)

Tendo determinado o valor do teor de umidade de equilíbrio da lenha pela Expressão 1, o Poder Calorífico Útil (PCU) foi calculado pela Expressão 8 (PEREIRA et. al., 2016):

$$\text{PCU (MJ/kg)} = \frac{\text{PCI} \times \left(1 - U_{eq}\right) - 600 \times U_{eq}}{239} \quad \textbf{(8)}$$

PCU = Poder calorífico útil (MJ/kg)

PCI = Poder calorífico inferior (MJ/kg)

$U_{eq}$ = Teor de umidade de equilíbrio da lenha (%)

*3.3.6 Análise Imediata da lenha*

Para determinar o teor de voláteis da Análise Imediata da madeira adaptou-se a metodologia da norma ASTM Standard E872-82 (2006), de acordo com os pressupostos apresentados no artigo de Sotannde et. al. (2010). As amostras de madeira foram inicialmente moídas em moinho do tipo Willye, modelo TE-650, para diminuir a sua granulometria. Após o processo de moagem, o material foi peneirado e utilizou-se a fração de serragem da madeira que passou pela peneira com poros de 0,355 mm (42 mesh) e retida na peneira de 0,25 mm (60 mesh). Os cadinhos de 25 mL foram previamente tarado à 700 ºC por 3 horas e em seguida colocou-se 4,0 g de serragem no cadinho com tampa em forno mufla marca Nova modelo MI 1384 e então aquecido a 600ºC durante 10 minutos. Foram realizadas três repetições para cada espécie de lenha**.** Determinou-se a porcentagem de materiais voláteis de acordo com a Expressão 9:

$$\text{TV (\%)} = \left(\frac{\text{m}_\text{s} - \text{m}_\text{f}}{\text{m}_\text{s}}\right) \times 100 \quad \textbf{(9)}$$

TV = Teor de voláteis (%)

$m_s$ = Massa seca da amostra (g)

$m_f$ = Massa final da amostra após pirolise por 10 min à 600ºC

Para a determinação da porcentagem do teor de cinzas adequou-se a metodologia de acordo com a norma TAPPI T211 om-85. A análise foi realizada em triplicata, colocando-se 4 g de serragem em cadinhos de porcelana de 25 mL previamente tarados; em seguida, os cadinhos foram colocados em forno mufla à 750ºC por 6 horas. O resfriamento do material se deu em um dessecador. O teor de cinzas foi determinado pela Expressão 10:

$$CZ(\%) = \left(\frac{m_r}{m_s}\right) \times 100 \quad \textbf{(10)}$$

CZ = Teor de cinzas (%)

$m_s$ = Massa seca da amostra (g)

$m_r$ = Massa residual da amostra após pirolise completa por 6h à 750°C

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado através da Expressão 11:

$$\mathrm{CF}(\%) = 100 - (\mathrm{CZ} + \mathrm{TV}) \quad \textbf{(11)}$$

CF = Teor de carbono fixo (%)

CZ = Teor de cinzas (%)

TV = Teor de voláteis (%)

*3.3.7 Análise Elementar e Equação de combustão incompleta*

A análise química elementar foi realizada em triplicata. As amostras foram inicialmente moídas e selecionadas em peneira de 42 mesh e 60 mesh. As amostras foram submetidas inicialmente à análise de CHNS-O, onde os seus componentes foram individualizados numa sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada um. Os dados foram processados pela Embrapa Floresta – Colombo – PR, no aparelho Modelo Vario Macro Clube, marca Elementar, determinando os valores percentuais de Carbono, Nitrogênio, Hidrogênio e Enxofre. O valor de oxigênio foi quantificado pela diferença do somatório do C, N, H e S com o total de 100%. Os dados da composição elementar da madeira são fornecidos

pelo equipamento na base combustível, sendo em seguida convertidos para a base seca e para a base de trabalho utilizando a Tabela 5.

**Tabela 5** – Fator de conversão da base combustível para a base seca e de trabalho.

| | **Base do combustível que se deseja obter o fator de conversão** | |
|---|---|---|
| **Base do combustível que se tem como dado** | Trabalho | Seca |
| **Combustível** | $\frac{100 - U(\%) - CZ(\%)}{100}$ | $\frac{100 - CZ(\%)}{100}$ |

U (%) é o teor de umidade e CZ (%) é teor de cinzas do combustível.

Os coeficientes da equação de combustão incompleta foram balanceados a partir da análise elementar na base de trabalho, que possibilitou a estimativa dos produtos gás carbônico ($CO_2$), monóxido de carbono (CO) e dióxido de enxofre ($SO_2$) (Machado et. al., 2016). A proporção de conversão do carbono do combustível em gás carbônico e monóxido de carbono seguiu a proporção de 93% de $CO_2$ e 7% de CO (Joshi *et. al*., 1989) de acordo com a Expressão 12. As equações de combustão incompleta balanceadas estão na Tabela 6.

$$\begin{gathered}(\mathrm{aC} + \mathrm{bH} + \mathrm{cO} + \mathrm{dN} + \mathrm{eS} + \mathrm{fU} + \mathrm{CZ}) + \mathrm{x}(\mathrm{O_2} + 3{,}76\mathrm{N_2}) \\ \downarrow \\ \mathrm{gCO_2} + \mathrm{h\ CO} + \mathrm{iU} + \mathrm{jSO_2} + \mathrm{kH_2O} + \mathrm{CZ} + \mathrm{lN_2}\end{gathered} \tag{12}$$

a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l = Coeficientes da equação de combustão incompleta

Ar = Composição do ar, sendo 21% de $O_2$ e 79% de $N_2$ ($O_2$+ 3,76 $N_2$)

C = Carbono

H = Hidrogênio

O = Oxigênio

N = Nitrogênio

S = Enxofre

U = Teor de umidade de equilíbrio

CZ = Cinzas

CO = Monóxido de carbono

$CO_2$ = Gás carbônico

$SO_2$ = Dióxido de enxofre

$H_2O$ = Água proveniente da combustão do hidrogênio

$N_2$ = Gás nitrogênio.

**Tabela 6** – Equações de combustão incompleta em triplicata para cada espécie.

**(continua)**

| | |
|---|---|
| ***Eucalyptus grandis*** | |
| 3,2407 C + 6,0706 H + 2,6145 O + 0,0112 N + 0,0004 S + 0,6787 $H_2O$ + 0,8238 + 3,3380 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 3,0138 $CO_2$ + 0,2268 CO + 0,0004 $SO_2$ + 3,0353 $H_2O$ + 12,5564 $N_2$ + 0,6787 $H_2O$ + 0,8238 | **Eq. 1** |
| 3,2519 C + 6,2129 H + 2,6081 O + 0,0106 N + 0,0004 S + 0,6694 $H_2O$ + 0,8254 + 3,3877 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 3,0243 $CO_2$ + 0,2276 CO + 0,0004 SO2 + 3,1065 H2O + 12,7429 $N_2$ + 0,6694 $H_2O$ + 0,8254 | **Eq. 2** |
| 3,2091 C + 6,1728 H + 2,5844 O + 0,0105 N + 0,0003 S + 0,7219 $H_2O$ + 0,8165 + 3,3481 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,9845 $CO_2$ + 0,2246 CO + 0,0003 $SO_2$ + 3,0864 $H_2O$ + 12,5940 $N_2$ + 0,7219 $H_2O$ + 0,8165 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus propínqua*** | |
| 3,0284 C + 5,6906 H + 2,4448 O + 0,0116 N + 0,0002 S + 0,9220 $H_2O$ + 2,0861 + 3,1229 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8164 $CO_2$ + 0,2120 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,8453 $H_2O$ + 11,7480 $N_2$ + 0,9220 $H_2O$ + 2,0861 | **Eq. 1** |
| 3,0510 C + 5,8058 H + 2,4620 O + 0,0117 N + 0,0002 S + 0,9212 $H_2O$ + 1,4377 + 3,1649 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8375 $CO_2$ + 0,2136 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,9029 $H_2O$ + 11,9058 $N_2$ + 0,9212 $H_2O$ + 1,4377 | **Eq. 2** |
| 3,0155 C + 5,6286 H + 2,4459 O + 0,0087 N + 0,0003 S + 0,9746 $H_2O$ + 1,3777 + 3,0944 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8044 $CO_2$ + 0,2111 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,8143 $H_2O$ + 11,6393 $N_2$ + 0,9746 $H_2O$ + 1,3777 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus pellita*** | |
| 3,1050 C + 5,9924 H + 2,4323 O + 0,0106 N + 0,0002 S + 0,9264 $H_2O$ + 1,0000 + 3,2785 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8877 $CO_2$ + 0,2174 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,9962 $H_2O$+ 12,3326 $N_2$ + 0,9264 $H_2O$ + 1,0000 | **Eq. 1** |
| 3,1205 C + 5,8604 H + 2,4537 O + 0,0106 N + 0,0001 S + 0,9031 $H_2O$ + 1,0276 + 3,2496 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,9020 $CO_2$ + 0,2184 CO + 0,0001 $SO_2$ + 2,9302 $H_2O$ + 12,2236 $N_2$ + 0,9031 $H_2O$ + 1,0276 | **Eq. 2** |
| 3,0852 C + 5,9541 H + 2,4159 O + 0,0117 N + 0,0001 S + 0,9522 $H_2O$ + 1,0611 + 3,2579 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8692 $CO_2$ + 0,2160 CO + 0,0001 $SO_2$ + 2,9771 $H_2O$ + 12,2555 $N_2$ + 0,9522 $H_2O$ + 1,0611 | **Eq. 3** |

**Tabela 6** – Equações de combustão incompleta em triplicata para cada espécie.

**(continuação)**

| | |
|---|---|
| ***Eucalyptus tereticornis*** | |
| 3,0225 C + 5,6857 H + 2,5178 O + 0,0118 N + 0,0002 S + 0,8563 $H_2O$ + 2,1728 + 3,0795 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8109 $CO_2$ + 0,2116 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,8429 $H_2O$ + 11,5847 $N_2$ + 0,8563 $H_2O$ + 2,1728 | **Eq. 1** |
| 3,0268 C + 5,6844 H + 2,5215 O + 0,0136 N + 0,0003 S+ 0,8795 $H_2O$ + 1,6192 + 3,0815 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8150 $CO_2$ + 0,2119 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,8422 $H_2O$ + 11,5932 $N_2$ + 0,8795 $H_2O$ + 1,6192 | **Eq. 2** |
| 3,0159 C + 5,6685 H + 2,5128 O + 0,0141 N + 0,0003 S + 0,8752 $H_2O$ + 1,9758 + 3,0714 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8048 $CO_2$ + 0,2111 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,8342 $H_2O$ + 11,5555 $N_2$ + 0,8752 $H_2O$ + 1,9758 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus urophylla*** | |
| 3,0809 C + 5,8028 H + 2,5667 O + 0,0120 N + 0,0005 S + 0,8547 $H_2O$ + 0,5903 + 3,1410 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8653 $CO_2$ + 0,2157 CO + 0,0005 $SO_2$ + 2,9014 $H_2O$ + 11,8161 $N_2$ + 0,8547 $H_2O$ + 0,5903 | **Eq. 1** |
| 3,0831 C + 5,9629 H + 2,5611 O + 0,0108 N + 0,0004 S + 0,8504 $H_2O$ + 0,5896 + 3,1858 ($O_2$ +3,7600 $N_2$) → 2,8672 $CO_2$ + 0,2158 CO + 0,0004 $SO_2$ + 2,9814 $H_2O$ + 11,9839 $N_2$ + 0,8504 $H_2O$ + 0,5896 | **Eq. 2** |
| 3,0844 C + 5,8705 H + 2,5636 O + 0,0120 N + 0,0004 S + 0,8516 $H_2O$ + 0,5904 + 3,1626 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8684 $CO_2$ + 0,2159 CO + 0,0004 $SO_2$ + 2,9353 $H_2O$ + 11,8975 $N_2$ + 0,8516 $H_2O$ + 0,5904 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus camaldulensis*** | |
| 2,9594 C + 5,6813 H + 2,4459 O + 0,0138 N + 2,0132E-04 S + 0,9259 $H_2O$ + 2,8042 + 3,0534 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,7523 $CO_2$ + 0,2072 CO + 2,0132E-04 $SO_2$ + 2,8407 $H_2O$ + 11,4878 $N_2$ + 0,9259 $H_2O$ + 2,8042 | **Eq. 1** |
| 2,9816 C + 5,7009H + 2,4568 O + 0,0121 N + 0,0003 S + 0,9075 $H_2O$ + 2,6963 + 3,0744 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,7729 $CO_2$ + 0,2087 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,8505 $H_2O$ + 11,5659 $N_2$ + 0,9075 $H_2O$ + 2,6963 | **Eq. 2** |
| 2,9860 C + 5,6865 H + 2,4722 O + 0,0134 N + 0,0003 S + 0,8996 $H_2O$ + 2,5373 + 3,0673 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,7770 $CO_2$ + 0,2090 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,8432 $H_2O$ + 11,5396 $N_2$ + 0,8996 $H_2O$ + 2,5373 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus urograndis*** | |
| 3,0852 C + 5,9823 H + 2,5335 O + 0,0108 N + 0,0004 S + 0,8471 $H_2O$ +1,0482 + 3,2064 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8692 $CO_2$ + 0,2160 CO + 0,0004 $SO_2$ + 2,9912 $H_2O$ + 12,0616 $N_2$ + 0,8471 $H_2O$ + 1,0482 | **Eq. 1** |
| 3,0844 C + 5,9433 H + 2,5382 O + 0,0102 N + 0,0003 S + 0,8596 $H_2O$ + 0,8070 + 3,1934 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8685 $CO_2$ + 0,2159 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,9716 $H_2O$ + 12,0124 $N_2$ + 0,8596 $H_2O$ + 0,8070 | **Eq. 2** |
| 3,0903 C + 5,9223 H + 2,5573 O + 0,0084 N + 0,0004 S + 0,8249 $H_2O$ + 1,0996 + 3,1845 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8740 $CO_2$ + 0,2163 CO + 0,0004 $SO_2$ + 2,9611 $H_2O$ + 11,9777 $N_2$ + 0,8249 $H_2O$ + 1,0996 | **Eq. 3** |

**Tabela 6** – Equações de combustão incompleta em triplicata para cada espécie.

**(conclusão)**

| ***Eucalyptus citriodora*** | |
|---|---|
| 3,0452 C + 5,9829 H + 2,5229 O + 0,0148 N + 0,0003 S + 0,8613 $H_2O$ + 1,3885 + 3,1732 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8320 $CO_2$ + 0,2132 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,9915 $H_2O$ + 11,9385 $N_2$ + 0,8613 $H_2O$ + 1,3885 | **Eq. 1** |
| 3,0377 C + 5,8599 H + 2,5185 O + 0,0124 N + 0,0003 S + 0,8489 $H_2O$ + 1,9296 + 3,1374 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8251 $CO_2$ + 0,2126 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,9299 $H_2O$ + 11,8027 $N_2$ + 0,8489 $H_2O$ + 1,9296 | **Eq. 2** |
| 3,0436 C + 5,9395 H + 2,5203 O + 0,0136 N + 0,0003 S + 0,8456 $H_2O$ + 1,7910 + 3,1621 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8305 $CO_2$ + 0,2131 CO + 0,0003 $SO_2$ + 2,9697 $H_2O$ + 11,8963 $N_2$ + 0,8456 $H_2O$ + 1,7910 | **Eq. 3** |
| ***Eucalyptus saligna*** | |
| 3,1304 C + 5,8979 H + 2,4368 O + 0,0112 N + 0,0002 S + 0,8428 $H_2O$ + 2,2143 + 3,2771 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,9113 $CO_2$ + 0,2191 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,9489 $H_2O$ + 12,3276 $N_2$ + 0,8428 $H_2O$ + 2,2143 | **Eq. 1** |
| 3,0849 C + 5,8612 H + 2,3934 O + 0,0128 N + 0,0002 S + 0,8918 $H_2O$ + 2,5873 + 3,2458 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8690 $CO_2$ + 0,2159 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,9306 $H_2O$ + 12,2106 $N_2$ + 0,8918 $H_2O$ + 2,5873 | **Eq. 2** |
| 3,1178 C + 5,9190 H + 2,4237 O + 0,0129 N + 0,0002 S + 0,8555 $H_2O$ + 2,3010 + 3,2768 ($O_2$ + 3,7600 $N_2$) → 2,8996 $CO_2$ + 0,2182 CO + 0,0002 $SO_2$ + 2,9595 $H_2O$ + 12,3274 $N_2$ + 0,8555 $H_2O$ + 2,3010 | **Eq. 3** |

A quantidade em massa dos produtos da combustão (CO, $CO_2$ e $SO_2$) para cada kg de lenha queimada foram obtidos da equação balanceada e em seguida foram convertidos para volume (Expressão 14) utilizando-se a densidade do gás nas condições normais de temperatura (273 K) e pressão (1atm) por meio da Expressão 13:

$$\rho = \frac{p \times M_{molar}}{R \times T} (gás\ nas\ CNTP) \quad \textbf{(13)}$$

ρ = Densidade do gás (kg/Nm³) na CNTP

p = Pressão de 101325 Pa

$M_{molar}$ = Massa molar do gás (kmol/kg)

R = Constante dos gases ideais de 8314 m³Pa/kmol K

T = Temperatura de 273,15 K

$$V_{gás} = \frac{m}{\rho} \quad \textbf{(14)}$$

$V_{gás}$ = Volume do gás (Nm³/kg)

m = Massa do gás (kg de gás/kg de combustível)
ρ = Densidade do gás (kg/Nm³)

*3.3.8 Fator de emissão e estimativa da concentração e exposição ao CO*

A combustão incompleta da madeira em ambientes fechados, como cozinhas, gera emissões de monóxido de carbono e assim pode resultar em altas concentrações de CO no ambiente. O método para predizer a concentração média (Cmédio, em mg/m$^3$), máxima (Cmax, em mg/m$^3$) e potencial de exposição (E, em h-mg/m$^3$) ao CO foi baseado nos pressupostos da pesquisa de Zhang et al. (1999), em que o fator de emissão do CO foi obtido pela Expressão 15 proveniente da equação de combustão incompleta da lenha, Tabela 9.

$$Ef_{co} = \frac{m_{co}}{m_{cb}} \tag{15}$$

$Ef_{co}$ = Fator de emissão do gás CO ($g_{co}/kg_{cb}$), onde cb é referente à massa do combustível.
$m_{co}$ = Massa de CO (g)
$m_{cb}$ = Massa do combustível (kg)

Com o valor do fator de emissão do CO é possível calcular a concentração e a exposição ao CO do fogão à lenha em uma cozinha hipotética. Adicionalmente, assume-se também que o CO se dilui homogeneamente no ar da cozinha, sendo removido somente pela ventilação e renovação natural do ambiente. Nestas condições, a concentração média e máxima de CO, bem como o potencial de Exposição ao gás (E) são dados pelas Expressões 16, 17 e 18. Adotou-se um volume para a cozinha de 40 m³ (volume típico das cozinhas da cidade de Irati/PR), com taxa de renovação do ar de 1 h$^{-1}$ (valor estimado para uma cozinha com somente uma porta e uma janela). O valor de $Ef_{co}$ (valor obtido da Expressão 15 de combustão incompleta) e F (consumo do combustível) foram determinados com os dados experimentais. No tempo de uso do fogão, assumiu-se como uma hora o período de preparação de cada refeição (café da manhã, almoço ou jantar).

$$C_{max} = \frac{\mathrm{F} \times Ef_{co}}{\mathrm{V} \times \mathrm{S}} \left(1 - e^{-ST}\right) \tag{16}$$

$$C_{médio} = \frac{\mathrm{F} \times Ef_{co}}{\mathrm{V} \times \mathrm{S}} \left(1 + \frac{1}{S \times T}(e^{-ST} - 1)\right)$$

**(17)**

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{F} \times Ef_{co}}{\mathrm{V} \times \mathrm{S}} \left(T - \frac{1}{S}(1 - e^{-ST})\right)$$

**(18)**

F = Consumo do combustível (kg/h)

$Ef_{co}$ = Fator de emissão do gás CO (quantidade de CO (g) por unidade de massa queimada de lenha (kg)), (g/kg)

T = Tempo de uso do fogão (h)

V = Volume da cozinha ($m^3$)

S = Taxa de renovação natural do ar ($h^{-1}$)

*3.3.9 Composição química da lenha*

As lenhas de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora* foram caracterizadas quimicamente por meio da determinação do teor de extrativos, cinzas, lignina e holocelulose (teor de celulose e de hemiceluloses). A madeira foi inicialmente moída e utilizou-se na caraterização a fração de serragem que ficou retida entre as peneiras de 42 – 60 mesh. O experimento foi realizado em triplicata. O teor de cinzas foi determinado de acordo com o item 3.3.6, pela Expressão 10.

Na determinação do teor de extrativos, foi colocado aproximadamente 2 g de serragem em um recipiente de papel filtro na câmara de extração do extrator Soxhlet, a serragem foi submetida a ciclos de lavagem com 150 mL de solução de Etanol 95% e Tolueno na proporção de 1:2 em volume, respectivamente. A extração ocorreu por um período mínimo de 3 horas, ajustando a velocidade de ebulição de modo a obter oito ciclos de extração por hora. O final da extração foi identificado por meio da limpidez do solvente na câmara de extração. O teor de extrativo é calculado pela Expressão 19 (NBR 14853).

$$\mathrm{TE} = \left(\frac{\mathrm{m_1} - \mathrm{m_2}}{\mathrm{m_1}}\right) \times 100$$

**(19)**

TE = Teor de extrativos (%)

$m_1$ = Massa (g) de amostra seca antes da extração

$m_2$ = Massa (g) da amostra seca após a extração

O teor de lignina solúvel e insolúvel foi determinado pelo método Klason de acordo com a norma NBR 7989. Pesou-se um grama de serragem de madeira livre de extrativos e transferiu-se para um béquer de 50 mL juntamente com 15 mL de ácido sulfúrico 72% por duas horas, promovendo agitação com um bastão de vidro. Em seguida, a solução foi transferida para um Erlenmeyer com 1000 mL de capacidade, diluída com 575 mL de água destilada e submetida a refluxo por 4 horas. No final de 4 horas, a mistura foi filtrada em um funil de vidro sinterizado para se obter a lignina insolúvel, a qual foi lavada com água quente até pH neutro, ficando retida no funil e posteriormente colocada para secagem em estufa a 105 ± 2ºC, até massa constante. O teor de lignina insolúvel foi determinado pela Expressão 20.

$$\text{Li (\%)} = \frac{m_s}{m_l} \times 100 \tag{20}$$

Li = Teor de lignina insolúvel na amostra (%)

$m_s$ = Massa seca da lignina insolúvel (g)

$m_l$ = Massa seca da amostra de serragem pré-extraída (g)

O filtrado produzido foi analisado por meio de espectroscopia na região do ultravioleta, com um espectrômetro da marca Shimadzu, modelo UV – 1800. As absorbâncias em 215 e 280 nm foram medidas, utilizando como referencia uma solução de ácido sulfúrico diluído na mesma concentração das amostras. A concentração de lignina solúvel foi determinada pela Expressão 21.

$$Lsf = \frac{4{,}53 \times A_{215} - A_{280}}{300} \tag{21}$$

Lsf = Concentração de lignina solúvel na amostra (g/L)

$A_{215}$ = Absorbância da solução em 215 nm

$A_{280}$ = Absorbância da solução em 280 nm

Com a determinação da concentração da lignina solúvel no filtrado, o teor de lignina solúvel foi calculado por meio da Expressão 22.

$$Ls\ (\%) = \frac{Lsf\ \times 590 \times 100}{m_s \times 1000} \tag{22}$$

Ls (%) = Concentração de lignina solúvel na amostra (%)

Ls = Concentração de lignina solúvel na amostra (g/L)

$m_s$ = Massa seca de serragem de madeira pré-extraída

O teor de lignina total ($L_t$) foi obtido pela soma da lignina insolúvel e da lignina solúvel, e o de holocelulose foi determinado por diferença utilizando a Expressão 23.

$$TH = 100 - (TE + CZ + L_t) \tag{23}$$

TH = Teor de holocelulose (%)

TE = Teor de extrativos (%)

CZ = Cinzas (%)

$L_t$ = Lignina total (%)

### 3.4 Determinação da eficiência do fogão à lenha

A eficiência de um fogão a lenha é a relação adimensional entre a energia fornecida na queima da lenha e a energia utilizada na cocção do alimento. Existem diversos métodos de ensaio, mas o procedimento adotado descrito a seguir, representa uma alternativa simplificada e representativa das condições de uso, em que a eficiência foi calculada com base na avaliação da quantidade de calor absorvido pela água em uma panela ($Q_u$) e a quantidade de calor fornecida pelo combustível ($Q_l$) em sua queima (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Foram efetuados cinco ensaios consecutivos para cada espécie do estudo. Cada ensaio consistiu em pesar certa quantidade de lenha antes e depois do aquecimento da água, com ocorrência de ebulição por 15 minutos, em uma panela de alumínio. A diferença entre a massa de lenha inicial e a final corresponde à massa de lenha consumida no aquecimento e ebulição

da água. A quantidade de calor absorvida pela água ($Q_u$) é expressa pela Expressão 24 (Volunteers in Technical Assistance, 1985):

$$Q_u = m_a \times C_a \times (T_{eb} - T_i) + m_{av} \times L_a \quad \textbf{(24)}$$

$Q_u$ = Calor absorvido pela água (kJ)

$m_a$ = Massa de água aquecida da temperatura ambiente até a temperatura de ebulição (kg)

$C_a$ = Calor específico da água (4,186 kJ/kg °C)

$T_{eb}$ = Temperatura de ebulição da água (°C)

$T_i$ = Temperatura da água no início do experimento

$m_{av}$ = Massa de água evaporada (kg)

$L_a$ = Calor latente de vaporização da água (2260 kJ/kg)

A quantidade de calor total fornecida pelo combustível (lenha queimada) ($Q_l$) foi calculada pela Expressão 25.

$$Q_l = m_q \times PCU \quad \textbf{(25)}$$

$Q_l$ = Calor total fornecido pela combustão da lenha (kJ)

$m_q$ = Massa de combustível queimado (kg)

PCU = Poder calorífico útil da lenha (kJ/kg)

A eficiência, em porcentagem, é o resultado da razão entre o calor absorvido pela água (calor útil) e a energia liberada na queima da lenha (Expressão 26).

$$Ef\ (\%) = 100 \times \left(\frac{Q_u}{Q_l}\right) \quad \textbf{(26)}$$

Ef = Eficiência do fogão à lenha (%)

$Q_u$ = Calor absorvido pela água (kJ)

$Q_l$ = Calor total fornecido pela combustão da lenha (kJ)

O valor do calor perdido nas paredes do fogão e nos gases quentes da chaminé ($Q_{pf}$)

foi calculado pela diferença entre a energia liberada pela lenha e o calor absorvido pela água de acordo com a seguinte Expressão 27:

$$\mathrm{Q_{pf}(kJ) = Q_l - Q_u}$$

**(27)**

$Q_{pf}$ = Calor perdido nas paredes do fogão e nos gases quentes da chaminé (kJ)

$Q_u$ = Calor absorvido pela água (kJ)

$Q_l$ = Calor total fornecido pela combustão da lenha (kJ)

O consumo de lenha pelo fogão foi calculado pela razão da quantidade de lenha utilizada e o tempo necessário para aquecer a água e fervê-la por 15 minutos, Expressão 28.

$$F = \frac{m_q}{t_q}$$

**(28)**

F = Consumo de lenha (kg/h)

$m_q$ = Massa de lenha queimada (kg)

$t_q$ = Tempo de queima (h)

A potência do fogão é definida pela quantidade de energia térmica útil, proveniente da queima da lenha, utilizada no aquecimento e fervura da água pelo tempo transcorrido neste experimento, Expressão 29.

$$P\ (kW) = \frac{m_q \times PCU \times Ef}{t_q}$$

**(29)**

P = Potência do fogão (kW)

$m_q$ = Massa de lenha queimada (kg)

PCU = Poder Calorífico Útil (kJ/kg)

Ef = Eficiência do fogão (%)

$t_q$ = Tempo de queima (h)

### 3.5 Espectrometria de Massas (EM)

Nesta pesquisa foram analisadas amostras de voláteis provenientes da queima da lenha de *Eucalyptus grandis*, em dois tipos diferentes de fornos metálicos para a cocção de alimentos, durante os ensaios de determinação da eficiência desses fogões.

As análises foram realizadas em espectrômetro de massas da marca Hi Cube Pfeiffer Vacuum, proveniente de uma adaptação de Head Space 80 da marca PFEIFFER, conforme a Figura 9. A detecção do aparelho foi feita em modo positivo de ionização sob pressão a vácuo de 1,0 x $10^{-4}$ mmHg, as amostras foram aplicadas por sucção a um fluxo de 10 µL $min^{-1}$, com pressão ideal de 8,6 x $10^{-5}$ mmHg. Aquisição e o processamento de dados foram realizados utilizando o software Quedera, e as análises foram obtidas em modo de scan continuo com determinação de compostos voláteis de 1 até 50 unidade de massa atômica (uma).

### 3.6 Análise termogravimétrica e calorimétrica

As análises de degradação térmica foram feitas utilizando-se o método termogravimétrico (TGA) e calorimétrico (DTA). As curvas de análises termogravimétricas foram obtidas com o equipamento Schimadzu modelo DTG-60H, utilizando célula de platina, atmosfera dinâmica de nitrogênio com velocidade do fluxo de 20 mL/min, taxa de aquecimento de 10°C/min e temperatura variando do ambiente até 600°C. A análise de calorimetria térmica diferencial foi realizada simultaneamente com as análises de TGA, nas mesmas condições.

### 3.7 Estatística básica

Os dados foram sumarizados por meio de sua média, desvio padrão e coeficiente de variação. Realizou-se uma análise prévia dos resultados, antes de se proceder a modelagem, por meio da determinação do coeficiente de variação e ocorrência de *outliers*. Essa pré-análise foi feita para verificar a qualidade e reprodutibilidade das médias obtidas em cada ensaio. O coeficiente de variação (CV) mede a homogeneidade dos dados em relação à média ($\overline{x}$) e desvio padrão (S), sendo definido pela seguinte Expressão 30:

$$\mathrm{CV}(\%) = \left(\frac{S}{\overline{x}}\right) \times 100$$

**(30)**

Nesta pesquisa consideraram-se variâncias heterogêneas médias com coeficiente de variação acima de 30%. A referência adotada foi de CV abaixo de 10%, como indicativo de dados ótimos (baixa dispersão); CV entre 10 e 20%, dados bons (media dispersão); CV entre 20 e 30%, dados ruins (alta dispersão) e CV acima de 30%, dados péssimos, não sendo utilizados nesta pesquisa. Adicionalmente, verificou-se a ocorrência de *outliers* por meio da Expressão 31. *Outliers* são observações com valores discrepantes. Usou-se como critério a ocorrência de *outliers* valores acima de dois (PGQu, 2013).

$$Outlier = \left(\frac{x_i - \overline{x}}{S}\right) > 2$$

**(31)**

$x_i$ = Observações

x = Média das observações

S = Desvio padrão

### 3.8 Análise de Variância e Teste de comparação de médias

A Análise de Variância (ANOVA) foi o teste estatístico utilizado para a comparação entre mais de duas médias, precedido pelo teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov, Cramér-von Mises, Anderson-Darling, Kuiper, Watson, Lilliefors e Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Bartlett) dos dados. Todas as amostras estavam balanceadas, com o mesmo número de repetições por análise. Havendo diferença significativa nas médias indicada pela ANOVA, foi realizado o teste Tukey à posteriore, com nível de significância de 5% de probabilidade de erro. As variáveis onde a ANOVA e o teste Tukey foram realizadas são: eficiência, potência, consumo de lenha, composição química (teor de extrativos, teor de holocelulose e teor de lignina), Poder Calorífico Superior (PCS), propriedade físicas (densidade aparente, densidade básica, porosidade e umidade de equilíbrio), concentração média e máxima de monóxido de carbono e potencial de exposição ao gás monóxido de carbono.

Na comparação do fogão aprimorado e fogão tradicional, foi realizado o teste Tukey de comparação de médias precedido pela significância da Análise de Variância (ANOVA) a 5% de probabilidade de erro.

### 3.9 Comparação de média com valor fixo

Foi realizada a estatística do teste de t (Volpato & Barreto, 2016) para as espécies de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*, Expressão 32, por meio da comparação da média do teor de lignina e Poder Calorífico Superior, representado pelo valor médio x, com um valor fixo μ obtido da literatura especializada, sendo S o desvio padrão da amostra e n número de observações (réplicas).

$$\mathrm{t} = \left| \frac{(x - \mu) \times \sqrt{n}}{S} \right| \tag{32}$$

Por meio da Tabela de distribuição t, considerando o grau de liberdade da amostra (n-1), sendo n o numero de observações experimentais, o valor crítico de t a partir do qual há diferença significativa, para p-valor de 0,05, foi obtido por meio da função do Excel INVT (p-valor; graus de liberdade). A média da amostra foi considerada diferente estatisticamente do valor de referência, quando o valor de t calculado pela Equação 32 foi maior que o valor de t tabelado da distribuição de Student.

### 3.10 Ajuste de modelos

Modelos matemáticos lineares foram ajustados aos dados experimentais, sendo definidas as seguintes variáveis: Carbono fixo (CF), Teor de voláteis (TV), Cinzas (CZ), Lignina (LIG), Extrativos (EXT), Holocelulose (HOLO), Consumo de lenha (F), Potência (P), Densidade básica (ρbas), Monóxido de carbono (CO) e Dióxido de carbono ($CO_2$). A partir desta definição das variáveis foram testados os seguintes modelo (Tabela 7):

**Tabela 7** – Modelos ajustados.

| Nº do modelo | Variável resposta | Modelo |
|---|---|---|
| **1** | Eficiência | $\mathrm{Ef}\ (\%) = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{F(Kg\|h)} + \beta_2 \mathrm{P(kW)}$ |
| **2** | Consumo de lenha | $\mathrm{F}\ (\%) = \beta_0 \mathrm{Por}\ (\%) - \beta_1 \mathrm{Ef}\ (\%)$ |
| **3** | Poder Calorífico Superior | $\mathrm{PCS\ (MJ\|Kg)} = \beta_0 \mathrm{LIG}(\%) + \beta_1 \mathrm{EXT}(\%) + \beta_2 \mathrm{HOLO}(\%)$ |
| **4** | Poder Calorífico Superior | $\mathrm{PCS\ (MJ\|Kg)} = \beta_0 \mathrm{CF}(\%) + \beta_1 \mathrm{TV}(\%)$ |
| **5** | Oxigênio | $\mathrm{O}\ (\%) = \beta_0 \mathrm{TV}(\%) + \beta_1 \mathrm{CF}(\%)$ |
| **6** | Carbono | $\mathrm{C}\ (\%) = \beta_0 \mathrm{TV}(\%) + \beta_1 \mathrm{CF}(\%)$ |
| **7** | Hidrogênio | $\mathrm{H}\ (\%) = \beta_0 \mathrm{TV}(\%) + \beta_1 \mathrm{CF}(\%)$ |
| **8** | Consumo de lenha | $\mathrm{F\ (kg/h)} = \beta_0 \mathrm{Ef}(\%) + \beta_1 \mathrm{CO_2}(\%)$ |
| **9** | Consumo de lenha | $\mathrm{F\ (kg/h)} = \beta_0 \mathrm{Ef}(\%) + \beta_1 \mathrm{CO}(\%)$ |

Onde: PCS: Poder calorífico superior; Ef: Eficiência; CF: Carbono fixo; TV: Teor de voláteis; CZ: Cinzas; LIG: Lignina; EXT: Extrativos; HOLO: Holocelulose; F: Consumo de lenha; P: Potência, ρbas: Densidade básica, CO: Monóxido de carbono e $CO_2$: Dióxido de carbono.

### 3.11 Avaliação dos modelos

A equação ajustada aos dados experimentais foi avaliada estatisticamente considerando α = 5%. As evidências de um ajuste adequado foram também verificados por meio do coeficiente de determinação ($R^2$), tendo como referência de adequabilidade da equação um valor próximo de um. Para cada equação de regressão ajustada é apresentado o valor do erro padrão da estimativa (Syx e Syx%).

Os pressupostos para o uso da análise de variância foram validados por meio de testes de normalidade (Kolmogorov – Smirnov, Shapiro – Wilk e Ruan – Joiner.) e homocedasticidade dos resíduos (Breush Pagan), sendo considerado normal e homocedástico para p-valores acima de 5% de probabilidade de erro. Adicionalmente, o gráfico do resíduo (RES) em função da variável resposta estimada ($Y_{est}$) por meio da equação de regressão; sendo que, distribuições aleatórias e de baixa amplitude dos resíduos é indicativo de um ajuste adequado. O valor do resíduo foi calculado por meio da Expressão 33, onde $Y_{obs}$ são os valores experimentais da variável resposta.

$$RES\ (\%) = \frac{Y_{obs} - Y_{est}}{Y_{obs}} \times 100 \qquad \textbf{(33)}$$

### 3.12 Matriz de correlação

Para os dados onde não foi possível fazer ajuste de uma equação de regressão, apresentou-se uma matriz de correlação com seus respectivos p-valores, para cada par de variáveis; utilizando-se o teste Pearson, sendo considerada a correlação significativa para p-valores abaixo de 5% de probabilidade de erro.

### 3.13 Teste de identidade L&O

Para regressões do PCS em função da análise imediata e da composição química, foram comparadas com equações similares da literatura especializada, por meio do teste de identidade do tipo L&O (Leite & Oliveira, 2002). Este teste compara o PCS estimado pela equação proposta nesta pesquisa com a equação de Shafizadeh & Degroot apud Sheng & Azevedo (2005). O teste L&O consiste em se processar uma equação de regressão linear entre duas estimativas, no caso $PCS_1 = \beta_0 + \beta_1 PCS_2$; sendo $PCS_1$ o Poder Calorífico Superior com os dados desta pesquisa e $PCS_2$ com os dados de Shafizadeh & Degroot apud Sheng & Azevedo (2005). As duas equações não apresentaram diferença estatísticas, sendo consideradas idênticas, se em suas estimativas ocorrer simultaneamente: $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$, gerando uma reta que passa pela origem do eixo cartesiano com inclinação de 45°. Em seguida, no teste L&O, adicionalmente o coeficiente de determinação e de correlação dessa reta tem que ser próximo de um. Desta forma, para equações que apresentam identidade, a hipótese nula do teste F ($h_0$: $\beta = [01]$), é significativa para 5% de probabilidade de erro. Adicionalmente, o teste t ($h_0$: $\bar{e} = 0$) do erro médio é não significativo e finalmente, o valor do coeficiente de correlação é maior que ($1 - |\bar{e}|$). Se esses pressupostos não forem simultaneamente atendidos, as duas equações comparadas não são significativamente iguais, o que indica estimativas diferentes do PCS. Adicionalmente, foram calculados o erro absoluto médio (AAE) e o bias (ABE) para os dados de regressão do PCS em função da composição química e análise imediata, sendo $PCS_{obs}$ o valor experimental do PCS, $PCS_{est}$ o valor estimado pela respectiva equação de regressão e n o número de observações (Expressões 34 e 35).

$$AAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{PCS_{obs} - PCS_{est}}{PCS_{obs}}\right| \times 100\% \qquad \textbf{(34)}$$

$$ABE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{PCS_{obs-}PCS_{est}}{PCS_{obs}}\right] \times 100\% \quad \textbf{(35)}$$

# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 Eficiência do Fogão à Lenha em Relação ao Consumo de Lenha e Potência

Observando os resultados da Tabela 8 e o ajuste feito na Tabela 10, por meio de uma equação de regressão linear, verifica-se que quanto maior a eficiência do fogão, menor será o consumo de lenha e maior sua potência. Desta forma, a eficiência do fogão à lenha tem correlação negativa com o consumo de lenha e positiva com a potência.

**Tabela 8** - Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Ef (eficiência), F (consumo de lenha) e P (potência) do fogão aprimorado de chaminé curta.

| Espécies | Ef (%) | F (kg/h) | P (kW) |
|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 14,10±1,14 (8,10) | 0,97±0,26 (26,73) | 0,60±0,15 (25,13) |
| ***E. propinqua*** | 13,85±1,11 (8,05) | 0,95±0,16 (16,87) | 0,53±0,10 (19,80) |
| ***E. pellita*** | 15,01±0,87 (5,80) | 0,79±0,13 (16,82) | 0,49±0,09 (18,16) |
| ***E. tereticornis*** | 11,06±0,34 (3,09) | 1,01±0,09 (8,83) | 0,48±0,04 (8,57) |
| ***E. urophylla*** | 12,43±0,68 (5,47) | 1,01±0,18 (17,37) | 0,52±0,09 (17,05) |
| ***E. camaldulensis*** | 14,35±0,73 (5,12) | 0,82±0,12 (15,12) | 0,46±0,05 (11,86) |
| ***E. urograndis*** | 12,19±0,54 (4,46) | 0,99±0,06 (5,77) | 0,50±0,01 (1,65) |
| ***C. citriodora*** | 9,39±0,63 (6,69) | 1,23±0,16 (12,87) | 0,49±0,06 (12,75) |
| ***E. saligna*** | 10,10±0,76 (7,48) | 1,11±0,09 (7,94) | 0,47±0,04 (9,57) |

Cada média é seguida pelo respectivo desvio-padrão. O coeficiente de variação encontra-se entre parênteses.

O ajuste dos dados está adequado (Tabela 10), havendo significância estatística da equação de regressão pelo teste F da Análise de Variância (ANOVA) (Tabela 9) bem como significância dos coeficientes da equação pelo teste t de Student, ao nível de probabilidade de erro de cinco por cento. A estimativa da eficiência em função do consumo de lenha (F) e potência (P) do fogão explica 91,37% dos dados experimentais, apresentando baixo coeficiente de variação (Syx% < 10%).

**Tabela 9** – Análise de Variância para o experimento de variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **F** | 1 | 69,26 | 69,26 | 201,41* | $1,26 \times 10^{-17}$ |
| **P** | 1 | 83,73 | 83,73 | 243,49* | $4,38 \times 10^{-19}$ |
| **Resíduos** | 42 | 14,44 | 0,34 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

**Tabela 10** – Estatística e coeficiente para a equação da eficiência.

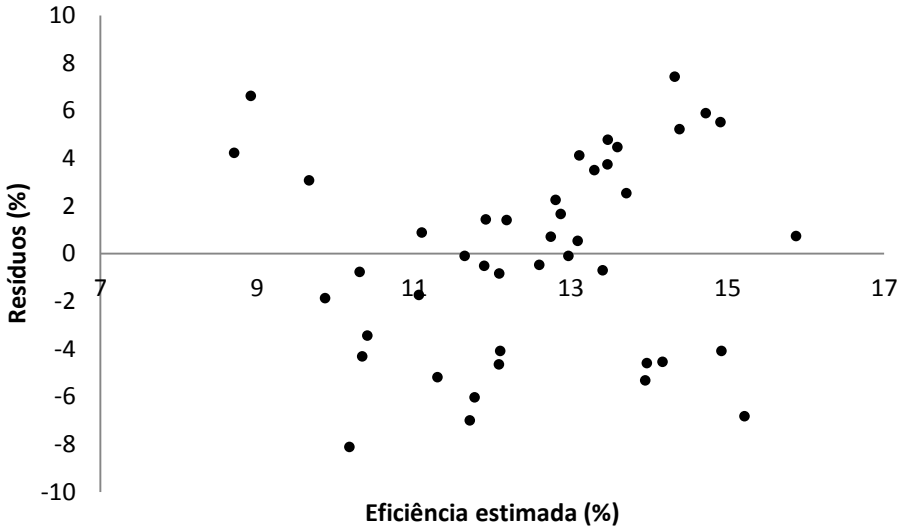
| Equação | | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{Ef = 14,0491 - 11,8568\ F + 19,9776\ P}$ | | | 45 | 0,9137 | 0,5864 | 4,73 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | | |
| **Intercepto** | | **F** | | **P** | | |
| Est. t | p-valor | Est.t | p-valor | Est. T | p-valor | |
| 23,86* | $4,76 \times 10^{-26}$ | -20,44* | $1,91 \times 10^{-23}$ | 15,60* | $4,38 \times 10^{-19}$ | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | Q-quadrado | p-Valor | |
| **Kolmogorov-Smirnov** | $0,07^{ns}$ | 0,79 | **Breusch-Pagan** | $2,63^{ns}$ | 0,10 | |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio da eficiência. Ef é a eficiência do fogão, F é o consumo de lenha e P é a potência. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 % de probabilidade de erro. Os valores da análise de resíduos com * são significativos e $^{ns}$ não significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

A equação de regressão indica que um fogão mais eficiente consome menos lenha, desta forma promove uma menor necessidade da colheita de árvores para o fornecimento do combustível ao usuário do fogão. Adicionalmente, uma eficiência maior promove também um melhor aproveitamento do calor liberado na queima da lenha, propiciando assim um aumento na potência do fogão.

Os pressupostos para a realização da regressão foram atendidos, havendo normalidade e homocedasticidade na distribuição dos resíduos. Na Figura 6, observa-se que o gráfico do resíduo em função da estimativa da eficiência possui um padrão aleatório e valores de baixa amplitude, confirmando assim a adequabilidade do ajuste.

**Figura 6 -** Distribuição dos resíduos em função dos valores estimados da Eficiência.




Na Tabela 14 estão representados os valores de eficiência (Ef), consumo de lenha (F) e potência (P) do fogão à lenha aprimorado (de chaminé curta e longa) e do fogão a lenha tradicional, para a espécie de *Eucalyptus grandis*. As amostras apresentam coeficientes de variação que indicam homogeneidade das variâncias de baixa à alta, com valores abaixo de 30%. As menores variabilidades foram obtidas para as medidas de eficiência (7 a 13%), com variabilidade de média a grande para consumo de lenha (10 a 26%) e de potência (6 a 25%). A maior variabilidade na medida de consumo de lenha e potência decorre da dificuldade de recuperar os resíduos da queima da lenha na câmera de combustão e obter assim uma precisão na determinação da quantidade de cinzas do fogão.

Estatisticamente há diferença significativa entre o fogão aprimorado (chaminé curta e longa) e o fogão tradicional. O fogão aprimorado apresenta maiores valores de eficiência e de

potência com um menor consumo de lenha (Tabela 11).

**Tabela 11** – Comparação entre a eficiência, consumo de lenha e potência do fogão aprimorado e o fogão à lenha tradicional na queima de *Eucalyptus grandis*.

| Espécies | Ef (%) | F (kg/h) | P (kW) |
|---|---|---|---|
| **Fogão à lenha aprimorado com pequena chaminé** | 14,10±1,14 a (8,10) | 0,97±0,26 b (26,73) | 0,60±0,15 a (25,13) |
| **Fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada** | 13,05±0,89 a (6,84) | 0,66±0,10 b (15,17) | 0,38±0,08 b (20,33) |
| **Fogão à lenha tradicional** | 0,86±0,12 b (13,59) | 2,64±0,26 a (10,00) | 0,10±0,01 c (6,85) |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Nos fogões à lenha metálicos, de toda energia liberada na queima da lenha, na forma de calor, parte desta é consumida como energia liquida para a cocção de alimento, sendo responsável por um ganho energético em torno de 16%. Para fogões à lenha sem sistema de isolamento da câmara de combustão, as perdas energéticas ocorrem principalmente na parede metálica (29%) e por convecção do ar quente que se desprende da parede metálica para o meio ambiente (1,9%). A perda de calor decorrente da liberação dos gases quentes pela chaminé é a que representa a maior porcentagem de perda (39%). A combustão incompleta contribui com uma pequena perda da ordem de 3%, sendo seu efeito de maior potencial de risco para a saúde do usuário do fogão, por apresentar na composição desta fumaça gases tóxicos entre eles o monóxido de carbono (BALDWIN,1987).

O fogão à lenha desta pesquisa tem tecnologia melhorada em relação ao fogão tradicional, apresentando sistema de isolamento térmico da câmara de combustão, o que diminui a perda energética por condução e por convecção na parede metálica. Adicionalmente, ocorre perda de calor por meio dos gases quentes da chaminé, porém o alongamento da chaminé do fogão aprimorado não conduziu a uma diferença estatística significativa na eficiência e consumo de lenha, o que sugere que o tamanho da chaminé não está diretamente relacionado com essas variáveis, (Tabela 11).

Comparando o fogão aprimorado de chaminé alongada com o fogão tradicional, os resultados demonstram que o fogão à lenha aprimorado apresenta um ganho energético, com

um melhor aproveitamento da energia térmica proveniente da queima da lenha. Este melhor aproveitamento energético propicia uma economia de 300% (explicar como calcula) no consumo da lenha e um aumento significativo de 280% na potência do fogão.

### 4.2 Propriedades físicas da lenha: Porosidade, densidade básica e aparente e teor de umidade de equilíbrio.

Um fator relevante quando se trata de madeira como suprimento energético é a densidade básica, pois ela expressa a quantidade de material lignino-celulósico combustível por unidade de volume. A porosidade sendo definida como a fração de vazios da lenha, influencia diretamente na densidade; pois, quanto mais densa a madeira menos espaços vazios ela contém (Brisolari, 2008) e desta forma menor será sua porosidade.

Com relação às estatísticas dos resultados, observa-se que há diferença significativa na porosidade, densidade básica e teor de umidade para as diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora* (Tabela 13). Não houve diferença estatística significativa no valor da densidade aparente para as diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*. A Tabela 12 que apresenta os dados de correlação evidenciou que não há uma associação significativa entre essas variáveis (p-valor > 0,05).

**Tabela 12** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da Porosidade, Densidade básica, densidade aparente e umidade de equilíbrio.

| Espécies | Porosidade (%) | ρbas (g/cm³) | Papar (g/cm³) | Umidade de equilíbrio % |
|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 57,22±0,00 ab (0,01) | 0,55±0,01 b (1,72) | 0,72±0,01 a (1,32) | 12,52±0,85 b (6,80) |
| ***E. propinqua*** | 59,03±0,02 a (0,04) | 0,55±0,01 b (2,50) | 0,72±0,05 a (6,22) | 17,06±0,71 a (4,14) |
| ***E. pellita*** | 53,36±0,03 c (0,06) | 0,55±0,01 bc (2,34) | 0,74±0,03 a (4,34) | 16,70±0,45 a (2,70) |
| ***E. tereticornis*** | 58,40±0,00 a (0,01) | 0,54±0,01 bc (2,66) | 0,71±0,07 a (9,27) | 15,72±0,68 ab (4,35) |
| ***E. urophylla*** | 57,02±0,02 abc (0,03) | 0,54±0,01 bc (2,27) | 0,70±0,04 a (5,75) | 15,62±0,71 ab (4,56) |
| ***E. camaldulensis*** | 59,70±0,01 a (0,02) | 0,55±0,01 b (1,77) | 0,73±0,08 a (10,45) | 17,87±3,42 a (19,13) |
| ***E. urograndis*** | 56,37±0,02 abc (0,03) | 0,52±0,01 cd (1,71) | 0,64±0,04 a (6,11) | 15,06±0,55 ab (3,65) |
| ***C. citriodora*** | 54,28±0,01 bc (0,03) | 0,59±0,01 a (2,26) | 0,71±0,07 a (9,86) | 15,39±0,60 ab (3,92) |
| ***E. saligna*** | 59,74±0,02 a (0,04) | 0,51±0,02 d (3,21) | 0,70±0,04 a (5,75) | 15,58±1,01 ab (6,51) |

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Por meio da modelagem dos dados (Tabela 12) e da matriz de correlação da porosidade com as variáveis densidade básica e teor de umidade de equilíbrio (Tabela 13), observa-se que não há correlação direta significativa (p-valor > 0,05) entre os pares de variáveis. A não correlação provavelmente decorre de uma quantidade de dados insuficientes para tal análise.

**Tabela 13** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis: porosidade, densidade básica e teor de umidade.

| Variáveis | Porosidade | P valor |
|---|---|---|
| **Densidade básica** | $-0,25^{ns}$ | 0,10 |
| **Densidade aparente** | $0,02^{ns}$ | 0,91 |
| **Teor de umidade** | $0,20^{ns}$ | 0,19 |

O valor do coeficiente de correlação com $^{ns}$ é não significativo, para o nível de significância de 5% de probabilidade de erro.

Pelo teste F da Análise de Variância (ANOVA) o ajuste dos dados está adequado (Tabela 14), havendo significância estatística das variáveis e equação de regressão. Observando a análise de regressão do consumo de lenha em função da porosidade e eficiência, expressa na Tabela 15, fica evidenciado que com a diminuição da eficiência do fogão em função do consumo de lenha, ocorre uma contribuição positiva da porosidade, o que favorece uma melhor aeração interna, contribuindo assim para o maior consumo de lenha. Sendo a combustão a reação química entre a lenha (combustível) com oxigênio proveniente do ar, uma maior porosidade pode favorecer uma melhor queima da lenha uma vez que o conteúdo de oxigênio, presentes no ar dos vazios celulares, é maior para as lenhas mais porosas. Sendo a lenha mais porosa, o fogão opera com um maior suplemento de ar; por conseguinte, terá uma queima mais limpa, e maior consumo de lenha na produção de energia.

**Tabela 14** – Análise de variância para as variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Poro** | 1 | 43,98 | 43,98 | 1665,81* | $5,07 \times 10^{-36}$ |
| **Ef** | 1 | 0,46 | 0,46 | 17,36* | $1,46 \times 10^{-04}$ |
| **Resíduos** | 43 | 1,14 | 0,03 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

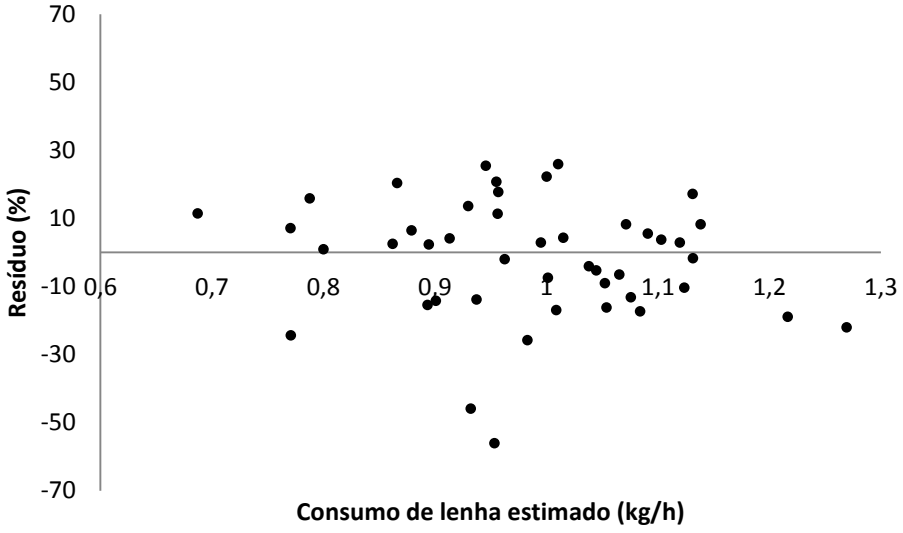
**Tabela 15** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha.

| Equação | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{F = 2,8311\ Por - 0,0511\ Ef}$ | | 45 | 0,9751 | 0,1625 | 16,41 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | |
| **Por** | | **Ef** | | | |
| Est. t | p-valor | Est.t | p-valor | | |
| 10,53* | 1,73 x 10-13 | -4,17* | 1,46 x 10-04 | | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | Q-quadrado | p-Valor |
| **Kolmogorov-Smirnov** | $0,07^{ns}$ | 0,86 | **Breusch Pagan** | $0,08^{ns}$ | 0,78 |

Nº é o número de observações; $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do consumo de lenha. F é o consumo de lenha, Por é a porosidade e Ef é a eficiência. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da estatística do teste da análise de resíduos com $^{ns}$ são não significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Os ajustes dos dados da equação de regressão expressa na Tabela 15, mostram que os pressupostos de normalidade e homocedasticidade dos resíduos da análise de variância foram atendidos. O ajuste está adequado apresentando um coeficiente de determinação próximo de um, conseguindo explicar em 97,51% as variações no consumo de lenha. Porém, com erro padrão da estimativa acima de 10%, o qual é aceitável dentro da variabilidade esperada para esses tipos de análises. Não há tendência na distribuição dos resíduos (Figura 7), observando uma distribuição aleatória, de baixa amplitude.

**Figura 7** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do consumo de lenha.




### 4.3 Análise da composição química (teor de lignina, holocelulose, extrativos e cinzas) da lenha e energética (Poder calorífico).

A composição química da madeira impacta seu conteúdo energético. O teor de lignina e o teor de extrativos são os componentes que mais contribuem para a densidade energética do combustível lenhoso. Para aplicações energéticas, o valor de referência do teor de lignina é 30%, sendo que um maior potencial energético ocorre para espécies com altos teores de lignina e extrativos. Na Tabela 16 apresenta-se os dados de composição química dos galhos das espécies de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*. Pelo teste Tukey observa-se que há diferença estatística na composição química das diferentes espécies.

**Tabela 16** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos PCS, ligninas, extrativos e holocelulose.

| Espécies | PSC (MJ/Kg) | Lignina (%) | Extrativos (%) | Holocelulose (%) |
|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 17,62±0,08 abc (0,44) | 30,19±0,48 ab (1,60) | 2,77±0,17 ab (6,02) | 66,10±0,35 de (0,53) |
| ***E. propinqua*** | 17,52±0,06 bcd (0,33) | 30,02±0,44 ab (1,46) | 1,05±0,21 e (19,81) | 66,96±0,91 bcd (1,36) |
| ***E. pellita*** | 17,67±0,10 ab (0,58) | 28,95±0,47 bcd (1,63) | 1,21±0,14 de (11,38) | 68,61±0,57 ab (0,84) |
| ***E. tereticornis*** | 17,22±0,13 e (0,74) | 29,62±0,44 abc (1,49) | 1,75±0,13 cde (7,71) | 66,35±0,25 cde (0,37) |
| ***E. urophylla*** | 17,34±0,04 de (0,21) | 27,88±0,32 d (1,14) | 2,15±0,31 bc (14,60) | 69,27±0,24 a (0,35) |
| ***E. camaldulensis*** | 17,42±0,03 cde (0,16) | 29,56±0,60 abc (2,01) | 1,67±0,36 cde (21,40) | 65,56±0,10 de (0,16) |
| ***E. urograndis*** | 17,44±0,12 bcde (0,68) | 28,43±0,33 cd (1,17) | 1,89±0,05 cd (2,52) | 68,52±0,16 abc (0,24) |
| ***C. citriodora*** | 17,77±0,03 a (0,18) | 30,28±1,09 ab (3,59) | 3,27±0,52 a (15,99) | 64,44±1,93 e (2,99) |
| ***E. saligna*** | 17,49±0,09 bcd (0,49) | 30,81±0,20 a (0,65) | 2,18±0,21 bc (9,43) | 64,20±0,54 e (0,84) |

Cada média é seguida pelo respectivo desvio-padrão. O CV (coeficiente de variação) encontra-se entre parênteses. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Comparando o teor de lignina e o PCS dos galhos com o teor de lignina e PCS do fuste da árvore (Tabela 17) observa-se que há uma tendência significativa de equivalência ou valor maior de teor de lignina para os galhos que para o fuste; no entanto, o PCS dos fustes das árvores apresenta maior valor que o da referida pesquisa. Esse resultado indica um maior potencial energético dos galhos como combustível, por apresentarem um maior teor de lignina; porém, outros componentes tais como teor de extrativo e teor de holocelulose, também colaboram para o PCS dos combustíveis lignocelulósicos. Para as espécies de *E. grandis, E. propínqua, E. tereticornis, E. urophylla, E. camaldulensis, C. citriodora e E. saligna* foi utilizada a referencia de Pereira *et al.*,2000; para *E. pellita*, de Oliveira *et al.*, 2010

e para o *E. urograndis*, de Soares *et al*., 2014.

**Tabela 17** – Valores da literatura para lenha proveniente do fuste das árvores de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*

| | **Dados da pesquisa para os galhos, coluna à esquerda, seguidos pelos dados da literatura para o fuste, coluna à direita** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Espécies** | **PSC (MJ/Kg)** | **PSC (MJ/Kg)** | **Lignina (%)** | **Lignina (%)** |
| ***E. grandis*** | 17,62±0,08 a (0,44) | 18,16 b | 30,19±0,48 a (1,60) | 23,9 b – 26,4 b |
| ***E. propinqua*** | 17,52±0,06 a (0,33) | 20,45 b | 30,02±0,44 a (1,46) | 29 a – 30,5 a |
| ***E. pellita*** | 17,67±0,10 a (0,58) | 18,98 b | 28,95±0,47 a (1,63) | 29,4 a – 30,6 b |
| ***E. tereticornis*** | 17,22±0,13 a (0,74) | 18,32 b | 29,62±0,44 a (1,49) | 28,1 b – 32,7 b |
| ***E. urophylla*** | 17,34±0,04 a (0,21) | 18,04 b | 27,88±0,32 a (1,14) | 27,3 a |
| ***E. camaldulensis*** | 17,42±0,03 a (0,16) | 21,28 b | 29,56±0,60 a (2,01) | 30 a – 30,6 a |
| ***E. urograndis*** | 17,44±0,12 a (0,68) | - | 28,43±0,33 a (1,17) | 21,97 b |
| ***C. citriodora*** | 17,77±0,03 a (0,18) | 19,74 b | 30,28±1,09 a (3,59) | 22,4 b |
| ***E. saligna*** | 17,49±0,09 a (0,49) | 19,38 b | 30,81±0,20 a (0,65) | 26,3 b – 27,9 b |

Cada média dos dados experimentais é seguida pelo respectivo desvio-padrão. O CV (coeficiente de variação) encontra-se entre parênteses. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

A Tabela 18 nos mostra através do teste F da ANOVA que o ajuste dos dados da regressão é significativo. Os dados de composição química foram modelados gerando a equação do Poder Calorífico Superior (PCS) em função do teor de lignina, extrativos e holocelulose (fração de polissarídeos consistindo da soma do teor de celulose e hemiceluloses),

Tabela 19. A equação apresenta uma adequada estimativa dos dados do PCS com um coeficiente de determinação próximo de um, o que explica 99,99% dos dados; com baixo valor de coeficiente de variação ($S_{yx}$% < 10%). Os pressupostos da análise de regressão foram atendidos, gerando uma equação com coeficientes significativos com distribuição normal e homocedástica dos resíduos, para um nível de 5% de probabilidade de erro.

**Tabela 18** – Análise de variância para as variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Lignina** | 1 | 883,05 | 883,05 | 35235,01* | $1,39 \times 10^{-50}$ |
| **Extrativos** | 1 | 7376,68 | 7376,68 | 294341,14* | $1,59 \times 10^{-39}$ |
| **Holocelulose** | 1 | 7,70 | 7,70 | 307,41* | $3,47 \times 10^{-15}$ |
| **Resíduos** | 24 | 0,60 | 0,03 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

**Tabela 19** – Estatística e coeficiente para a equação de poder calorífico superior.

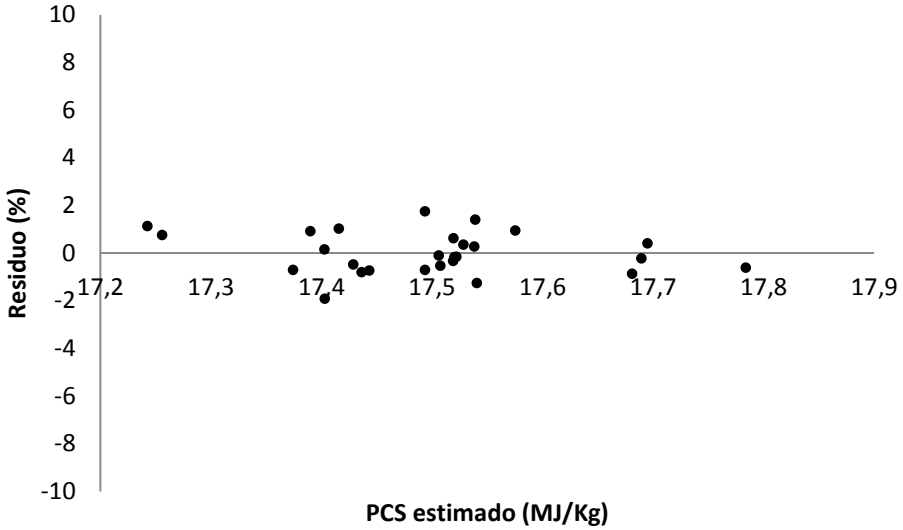
| Equação | | | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{PCS = 0,2648\ LIG + 0,1601\ EXT + 0,1404\ HOLO}$ | | | | 27 | 0,9999 | 0,1583 | 0,87 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | | | |
| **LIG** | | **EXT** | | **HOLO** | | | |
| Est. t | p-valor | Est.t | p-valor | Est. T | p-valor | | |
| 13,78* | $6,79 \times 10^{-13}$ | 3,45* | $2,09 \times 10^{-03}$ | 17,53* | $3,47 \times 10^{-15}$ | | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | Q-quadrado | p-Valor | | |
| **Kolmogorov-Smirnov** | $0,11^{ns}$ | 0,54 | **Breusch Pagan** | $0,83^{ns}$ | 0,36 | | |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do poder calorífico superior. LIG é o teor de lignina; EXT é o teor de extrativos; HOLO é o teor de holocelulose. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da estatística do teste da análise de resíduos com $^{ns}$ são não significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Pela Figura 8, não há tendência na distribuição dos resíduos para a equação de poder

calorífico superior estimado, ocorrendo uma distribuição aleatória de baixa amplitude, o que adicionalmente evidencia que o ajuste da equação está adequado aos dados.

**Figura 8** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais de PCS.




Por meio da equação de regressão, que estima o valor do PCS, observa-se que há proporcionalmente uma maior contribuição do teor de lignina e extrativos que do teor de holocelulose no PCS da lenha; na proporção de 1,9 lignina: 1,1 extrativos: 1 holocelulose ou em percentuais 47,5%:27,5:25% respectivamente. Isso evidencia o que já vem sendo relatado na literatura especializada (Fengel & Wegener, 1984) que sendo a lignina e extrativos componentes de maior teor de carbono e menor teor de oxigênio que a holocelulose, ambos contribuem de maneira mais efetiva para o conteúdo energético da lenha.

Foi feita uma comparação da equação da Tabela 19 com a equação de Shafizadeh & Degroot apud Sheng & Azevedo (2005) (Tabela 20), por meio de um teste estatístico denominado teste de identidade L&O. As equações são estatisticamente iguais (teste F e T não significativos, com ocorrência de correlação) e; portanto, para os dados desta pesquisa, ambas as equações apresentam estimativas adequadas do PCS em função da composição química.

**Tabela 20** – Teste de identidade

| Teste de Identidade do tipo L&O | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Equação Almeida et. al, 2017*** $\boldsymbol{PCS_1 = 0,2648\ \mathrm{LIG} + 0,1601\ \mathrm{EXT} + 0,1404\ \mathrm{HOLO}}$ | | | | ***Equação Shafizadeh e Degroot, 2005*** $PCS_2 = 0{,}2663\ \mathrm{LIG} + 0{,}3219\ \mathrm{EXT} + 0{,}1739\ \mathrm{HOLO}$ | |
| **Teste F** | | **Teste t** | | **Coeficiente de correlação** | |
| Est. F | p-valor | Est. t | p-valor | $PCS_1 = 6{,}0075 + 0{,}5717\ PCS_2$ | |
| $-13{,}00^{ns}$ | > 0,05 | $1{,}00^{ns}$ | > 0,05 | r | 0,85 |
| **ABE (%)** | | **AAE (%)** | | **ABE (%)** | **AAE (%)** |
| -0,0052 | | 0,72 | | -14,87 | 14,87 |

Os valores da estatística dos testes com $^{ns}$ são não significativos, com nível de significância de 5% de probabilidade de erro.

Apesar de ambas as equações serem estatisticamente equivalentes (teste L&O), esta pesquisa sugere o uso da equação de Almeida et. al. por apresentar um valor médio menor do Erro Absoluto Médio (AAE) e Bias (ABE), bem como uma distribuição aleatória dos resíduos; enquanto, que a equação de Shafizadeh & Degroot apud Sheng & Azevedo (2005) subestima todos os valores experimentais observados (Tabela 20).

### 4.4 Análise imediata (teor de carbono fixo, teor de voláteis e teor de cinzas) da lenha e energética (Poder calorífico)

Os dados da Tabela 21 apresentam a média dos valores do PCS e da análise imediata. As medidas de carbono fixo e voláteis apresentam-se homogêneas com coeficiente de variação abaixo de 10%. Maior variabilidade foi observada nos teores de cinzas com coeficientes de variações na faixa de 0,10 a 23,66%, o que indica uma maior variabilidade e menor precisão experimental.

**Tabela 21** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do PCS, CF, CZ e TV.

| Espécies | PSC (MJ/Kg) | Carbono fixo (%) | Cinzas (%) | Voláteis (%) |
|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 17,62±0,08 (0,44) | 23,89±1,03 (4,32) | 0,97±0,15 (15,87) | 75,15±1,03 (1,37) |
| ***E. propínqua*** | 17,52±0,06 (0,33) | 22,06±1,00 (4,55) | 1,97±0,46 (23,66) | 75,98±1,00 (1,32) |
| ***E. pellita*** | 17,67±0,10 (0,58) | 22,40±1,24 (5,52) | 1,24±0,04 (3,32) | 76,36±1,24 (1,62) |
| ***E. tereticornis*** | 17,22±0,13 (0,74) | 25,46±1,87 (7,34) | 2,28±0,33 (14,37) | 72,26±1,87 (2,59) |
| ***E. urophylla*** | 17,34±0,04 (0,21) | 21,68±1,08 (4,98) | 0,70±0,00 (0,10) | 77,62±1,08 (1,39) |
| ***E. camaldulensis*** | 17,42±0,03 (0,16) | 22,06±1,00 (4,55) | 3,21±0,17 (5,29) | 73,39±1,62 (2,21) |
| ***E. urograndis*** | 17,44±0,12 (0,68) | 20,91±0,99 (4,75) | 1,16±0,18 (15,56) | 77,93±0,99 (1,27) |
| ***C. citriodora*** | 17,77±0,03 (0,18) | 24,53±1,62 (6,61) | 2,01±0,33 (16,37) | 73,46±1,62 (2,21) |
| ***E. saligna*** | 17,49±0,09 (0,49) | 23,65±1,04 (4,38) | 2,80±0,25 (8,8) | 73,54±1,04 (1,41) |

Cada média é seguida pelo respectivo desvio-padrão. O coeficiente de variação encontra-se entre parênteses.

Pelo teste F da Análise de Variância (ANOVA) o ajuste dos dados está adequado (Tabela 22), havendo significância estatística das variáveis e da equação de regressão. A equação de regressão linear expressa na Tabela 23, estima o valor do PCS em função da variação no teor de carbono fixo e de voláteis. Relativo à adequabilidade da equação na estimação do PCS, observa-se a ocorrência de normalidade e homogeneidade dos resíduos, bem como a significância estatística da equação e de seus respectivos coeficientes. Com baixo valor de coeficiente de variação da regressão ($S_{yx}$ < 10%) e coeficiente de determinação ($R^2$) próximo de um. O valor de $R^2$, de aproximadamente 0,99, indica que o PCS explica cerca de 99% da variação nos valores de carbono fixo e teor de voláteis. A análise estatística da regressão indica um ajuste adequado.

**Tabela 22** – Análise de variância para as variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Carbono fixo** | 1 | 6,81 | 6,81 | 162,49* | $1,95 \times 10^{-12}$ |
| **Voláteis** | 1 | 8260,18 | 8260,18 | 197077,16* | $3,09 \times 10^{-50}$ |
| **Resíduos** | 25 | 1,05 | 0,04 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

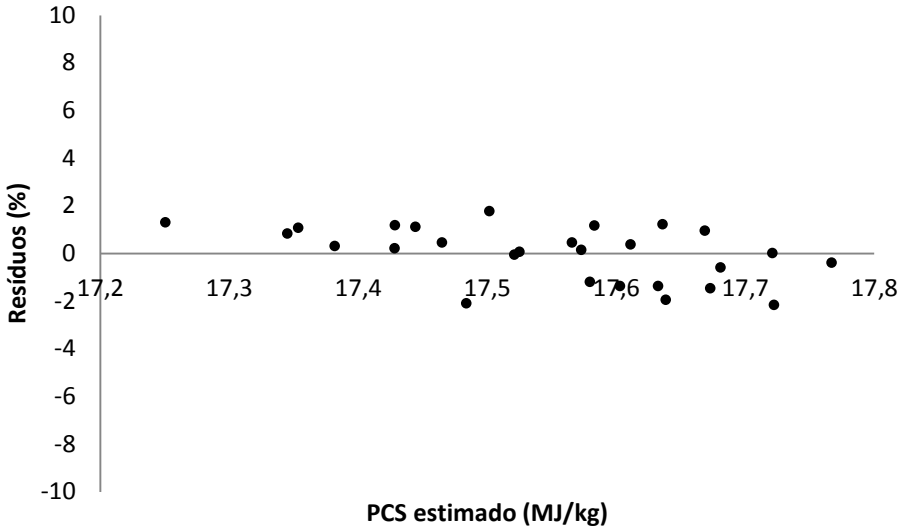
**Tabela 23** – Estatísticas para a equação de poder calorífico superior.

| Equação | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| $\boldsymbol{PCS = 0,2101\ CF + 0,1684\ TV}$ | | 27 | 0,9999 | 0,2047 | 1,17 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | |
| **Carbono fixo** | | | **Voláteis** | | |
| Est. t | p-valor | | Est.t | p-valor | |
| 12,75* | $1,95 \times 10^{-12}$ | | 33,11* | $3,61 \times 10^{-22}$ | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | Q-quadrado | p-Valor |
| **Kolmogorov-Smirnov** | 0,14* | 0,16 | **Breusch Pagan** | 0,18* | 0,67 |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é o erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do PCS: poder calorífico superior. CF: carbono fixo; TV: teor de voláteis. Os valores da análise de resíduos com * são significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Não há tendência na distribuição dos resíduos para a equação de poder calorífico superior estimado (Figura 9), ocorrendo uma distribuição aleatória dos resíduos, com baixa amplitude. Essa baixa variabilidade na dispersão dos resíduos indica que a distribuição é normal e que a equação se ajusta de maneira adequada aos dados.

**Figura 9** – Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais de PCS.




A equação de regressão indica que o teor de carbono fixo e voláteis são as variáveis que influenciam na estimativa do PCS; no entanto, o teor de cinzas não apresentou significância estatística na modelagem desses dados. Sabe-se da literatura especializada que a pirólise da biomassa gera um componente de alto teor calórico, carbono fixo, proveniente da degradação térmica da lignina. A lignina é uma macromolécula altamente reduzida com alto teor de carbono e baixo teor de oxigênio, tornando-a altamente energética. Na composição do teor de voláteis, a maior participação na sua produção ocorre devido à degradação térmica dos polissacarídeos da lenha (celulose e hemiceluloses) gerando moléculas de baixa massa molar com alto teor de oxigênio e baixo teor de carbono. Um alto teor de oxigênio indica moléculas orgânicas parcialmente oxidadas e, portanto com menor conteúdo energético. Na estimativa do PCS a influencia do CF e TV foi de 55,51% e 44,49% respectivamente, valores condizentes com os reportados na literatura (Machado et. al., 2016).

A partir da equação de regressão proposta por esta pesquisa, pode-se realizar um teste de identidade (Tabela 24) comparando a equação deste estudo com a equação proposta por Parikh *et. al*, 2005. A equação de Parikh *et. al, 2005.* resultou da modelagem de 450 dados de combustíveis sólidos provenientes de biomassa e fósseis, utilizando 100 amostras para a validação da equação sendo; portanto, uma equação não especifica para combustíveis lignocelulosicos.

Este cálculo de PCS é fácil e rápido não demandando de equipamentos sofisticados e pessoal treinado.

De acordo com o teste de identidade L&O as equações são estatisticamente diferentes. Adicionalmente, a equação de Almeida et. al. apresenta valor médio menor do Erro Absoluto Médio (AAE) e Bias (ABE), bem como uma distribuição aleatória dos resíduos; enquanto, que a equação de *Parikh et. al, 2005* subestima todos os valores experimentais observados (Tabela 24).

**Tabela 24** – Teste de identidade

| **Teste de Identidade do tipo L&O** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Equação Almeida et. al, 2017*** | | ***Equação Parikh et. al., 2005*** | | | |
| $\boldsymbol{PCS_1 = 0,2101\ \mathrm{CF} + 0,1684\ \mathrm{TV}}$ | | $PCS_2 = 0{,}3536\ \mathrm{CF} + 0{,}1559\ \mathrm{TV} - 0{,}0078\ \mathrm{CZ}$ | | | |
| **Teste F** | | **Teste t** | | **Coeficiente de correlação** | |
| Est. F | p-valor | Est. t | p-valor | $PCS_1 = 13{,}4047 + 0{,}2059\ PCS_2$ | |
| 5996,59* | < 0,05 | 50,505* | < 0,05 | R | 0,52 |
| **ABE (%)** | | **AAE (%)** | **ABE (%)** | | **AAE (%)** |
| -0,0047 | | 0,94 | -13,52 | | 13,52 |

Os valores da estatística dos testes com * são significativos, com nível de significância de 5% de probabilidade de erro.

### 4.5 Composição elementar e imediata do combustível lignocelulósico

Os dados de composição elementar e imediata, Tabela 25, foram analisados estatisticamente visando verificar a ocorrência de correlação para em seguida se proceder a modelagem por meio de regressão linear.

**Tabela 25** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Enxofre na base seca, Nitrogênio na base seca, Teor de voláteis e Carbono fixo.

| Espécies | S (%) | N (%) | TV (%) | CF (%) |
|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 0,012±0,0011 (9,36) | 0,17±0,01 (3,33) | 75,15±1,03 (1,37) | 23,89±1,03 (4,32) |
| ***E. propinqua*** | 0,009±0,0020 (22,31) | 0,18±0,03 (15,52) | 75,98±1,00 (1,32) | 22,06±1,00 (4,55) |
| ***E. pellita*** | 0,005±0,0035 (65,88) | 0,18±0,01 (6,15) | 76,36±1,24 (1,62) | 22,40±1,24 (5,52) |
| ***E. tereticornis*** | 0,010±0,0015 (14,47) | 0,22±0,02 (9,50) | 72,26±1,87 (2,59) | 25,46±1,87 (7,34) |
| ***E. urophylla*** | 0,017±0,0025 (14,52) | 0,19±0,01 (5,97) | 77,62±1,08 (1,39) | 21,68±1,08 (4,98) |
| ***E. camaldulensis*** | 0,010±0,0017 (17,45) | 0,22±0,01 (6,69) | 73,39±1,62 (2,21) | 22,06±1,00 (4,55) |
| ***E. urograndis*** | 0,014±0,0015 (11,03) | 0,16±0,02 (12,81) | 77,93±0,99 (1,27) | 20,91±0,99 (4,75) |
| ***C. citriodora*** | 0,011±0,0011 (10,74) | 0,23±0,02 (9,02) | 73,46±1,62 (2,21) | 24,53±1,62 (6,61) |
| ***E. saligna*** | 0,008±0,0005 (6,50) | 0,20±0,02 (8,09) | 73,54±1,04 (1,41) | 23,65±1,04 (4,38) |

Verificou-se a inexistência de correlação (p-valor > 0,05) entre o teor de enxofre e o teor de voláteis e carbono fixo, Tabela 26. Apesar de ser significativa a correlação entre o teor de nitrogênio e o teor de voláteis e carbono fixo, não houve significância na modelagem da estimativa do teor de nitrogênio em função da composição imediata. Esses resultados são decorrentes da alta variabilidade das médias dos elementos, enxofre e nitrogênio, comprovado por meio de valores alto de coeficiente de variação, com cv acima de 30% para as amostras de *E. pellita* e *E. propínqua* na concentração de enxofre; e acima de 10% para as amostras de *E. propínqua* e *C. citriodora* na concentração de nitrogênio.

**Tabela 26** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, Enxofre, Nitrogênio, Carbono fixo e Teor de voláteis.

| Variáveis | S (%) | P valor | N (%) | P valor |
|---|---|---|---|---|
| **TV (%)** | 0,32* | 0,11 | $-0,68^{ns}$ | $9,09 \times 10^{-5}$ |
| **CF (%)** | -0,19* | 0,34 | $0,59^{ns}$ | $1,23 \times 10^{-3}$ |

O valor da análise do enxofre e do nitrogênio com * são significativos e com $^{ns}$ é não significativo, para o nível de significância de 5% de probabilidade de erro.

Com os dados da Tabela 27, realizou-se uma modelagem por meio da qual foi possível propor equações de regressão do teor de oxigênio, carbono e hidrogênio em função do teor de voláteis e de carbono fixo. As médias apresentam-se com valores de coeficiente de variação abaixo de 10%, sem ocorrência de outlier, indicativo de que os dados estão homogêneos e adequados para se proceder à modelagem estatística.

**Tabela 27** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Oxigênio, Teor de voláteis e Carbono fixo.

| Espécies | O (%) | C (%) | H (%) | TV (%) | CF (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 47,54±0,10 (0,22) | 44,31±0,06 (0,12) | 7,02±0,10 (1,37) | 75,15±1,03 (1,37) | 23,89±1,03 (4,32) |
| ***E. propinqua*** | 47,19±0,28 (0,60) | 43,78±0,18 (0,42) | 6,87±0,08 (1,14) | 75,98±1,00 (1,32) | 22,06±1,00 (4,55) |
| ***E. pellita*** | 46,75±0,12 (0,26) | 44,70±0,02 (0,05) | 7,13±0,11 (1,55) | 76,36±1,24 (1,62) | 22,40±1,24 (5,52) |
| ***E. tereticornis*** | 47,76±0,16 (0,33) | 43,00±0,14 (0,33) | 6,73±0,02 (0,25) | 72,26±1,87 (2,59) | 25,46±1,87 (7,34) |
| ***E. urophylla*** | 48,45±0,08 (0,16) | 43,70±0,01 (0,03) | 6,94±0,09 (1,32) | 77,62±1,08 (1,39) | 21,68±1,08 (4,98) |
| ***E. camaldulensis*** | 47,05±0,13 (0,28) | 42,71±0,08 (0,20) | 6,81±0,02 (0,26) | 73,39±1,62 (2,21) | 22,06±1,00 (4,55) |
| ***E. urograndis*** | 47,98±0,13 (0,26) | 43,67±0,12 (0,27) | 7,01±0,05 (0,77) | 77,93±0,99 (1,27) | 20,91±0,99 (4,75) |
| ***C. citriodora*** | 47,63±0,12 (0,25) | 43,12±0,11 (0,27) | 7,00±0,08 (1,17) | 73,46±1,62 (2,21) | 24,53±1,62 (6,61) |
| ***E. saligna*** | 45,80±0,17 (0,38) | 44,20±0,09 (0,21) | 6,98±0,02 (0,32) | 73,54±1,04 (1,41) | 23,65±1,04 (4,38) |

Atendendo os pressupostos da análise de variância (ANOVA) pelo teste F, os ajustes dos dados estão adequados (Tabelas 28, 29 e 30), havendo significância das variáveis, da equação e dos coeficientes da equação de regressão.

**Tabela 28** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Oxigênio.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Voláteis** | 1 | 60505,19 | 60505,19 | 156994,54* | $5,29 \times 10^{-49}$ |
| **Carbono fixo** | 1 | 36,73 | 36,73 | 95,30* | $5,20 \times 10^{-10}$ |
| **Resíduos** | 25 | 9,63 | 0,39 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

**Tabela 29** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Carbono.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Voláteis** | 1 | 51508,44 | 51508,44 | 168008,03* | $2,27 \times 10^{-49}$ |
| **Carbono fixo** | 1 | 28,80 | 28,80 | 93,92* | $6,01 \times 10^{-10}$ |
| **Resíduos** | 25 | 7,66 | 0,31 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

**Tabela 30** – Análise de variância para as variáveis independentes em função do Hidrogênio.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Voláteis** | 1 | 1301,34 | 1301,34 | 98372,17* | $1,82 \times 10^{-46}$ |
| **Carbono fixo** | 1 | 0,72 | 0,72 | 57,62* | $9,65 \times 10^{-08}$ |
| **Resíduos** | 25 | 0,33 | 0,01 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

A regressão que estima o teor de oxigênio e carbono em função do teor de voláteis e carbono fixo foi significativa ao nível de probabilidade de erro de 0,05, Tabela 31 e 32. O coeficiente de determinação explica 99,98% dos valores do teor de oxigênio e 99,99% para o teor de carbono, com erro padrão da estimativa em porcentagem abaixo de 10%. A distribuição dos resíduos é homocedástica, porém não segue distribuição normal.

**Tabela 31** – Estatísticas para a equação do oxigênio.

| Equação | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{O = 0,4805\ TV + 0,4880\ CF}$ | 27 | 0,9998 | 0,6208 | 1,31 |

**Significância dos coeficientes da equação**

| Voláteis | | Carbono fixo | |
|---|---|---|---|
| Est. t | p-valor | Est.t | p-valor |
| 31,15* | $1,59 \times 10^{-21}$ | 9,76* | $5,20 \times 10^{-10}$ |

**Análise de Resíduo da Regressão**

| *Teste de Normalidade* | | | *Teste de Homocedasticidade* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Tipo de teste** | Est. R | p-Valor | **Tipo de Teste** | Q-quadrado | p-Valor |
| **Ryan-Joiner** | 0,95* | 0,01 | **Breusch Pagan** | 0,80* | 0,37 |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do oxigênio. TV: teor de volatéis, CF: carbono fixo. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da análise de resíduos com * são significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Os coeficientes da equação de regressão apresentam uma contribuição equivalente do teor de voláteis e do teor de carbono fixo na estimativa do teor de oxigênio e o contrário se observa para o teor de carbono, Tabelas 34 e 35 Segundo a literatura especializada, o teor de voláteis decorre principalmente da degradação térmica dos polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) com liberação de moléculas de baixa massa molar. Sendo os polissarídeos ricos em grupos hidroxilas por serem poli-álcoois, esperava-se uma maior contribuição do teor de voláteis na estimativa da concentração de oxigênio.

**Tabela 32** – Estatísticas para a equação do carbono.

| Equação | | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{C = 0,4489\ TV + 0,4320\ CF}$ | | | 27 | 0,9999 | 0,5537 | 1,27 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | | |
| **Voláteis** | | | **Carbono fixo** | | | |
| Est. t | p-valor | | Est.t | | p-valor | |
| 32,63* | $5,13 \times 10^{-22}$ | | 9,69* | | $6,01 \times 10^{-10}$ | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. R | p-Valor | **Tipo de Teste** | | Q-quadrado | p-Valor |
| **Ryan-Joiner** | $0,94^{ns}$ | 0,007 | **Breusch Pagan** | | 0,72* | 0,40 |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do carbono. TV: teor de voláteis, CF: carbono fixo. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da análise de resíduos com * são significativos e $^{ns}$ não significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Adicionalmente, sendo o carbono fixo formado principalmente da decomposição da lignina, que é um polifenol de alta concentração de anéis aromáticos, sendo, portanto uma fração rica em carbono e pobre em oxigênio, o que deveria de diminuir a contribuição do teor de carbono fixo na estimativa da concentração de oxigênio (Tabela 31) e promover um aumento na estimativa do teor de carbono (Tabela 32). Porém, há também a contribuição do teor de extrativos, rico em carbono e componente do teor de voláteis, o qual provavelmente influenciou na contribuição equivalente do teor de carbono fixo e voláteis na estimativa final do teor de oxigênio e uma maior participação de teor de voláteis na estimativa do teor de carbono.

A não normalidade dos resíduos não é um fator limitante para a realização da regressão uma vez que os gráficos dos resíduos em função do teor estimado de oxigênio e carbono, Figura 10 e 11, apresentam-se com um padrão aleatório e de baixa amplitude, o que sugere que a distribuição dos resíduos pode ser considerada próxima da normalidade.

**Figura 10** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de oxigênio.

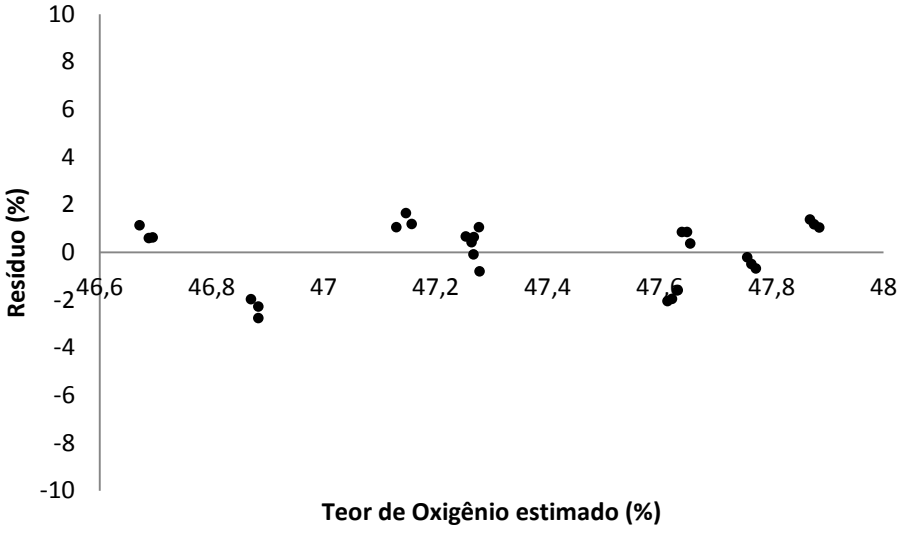
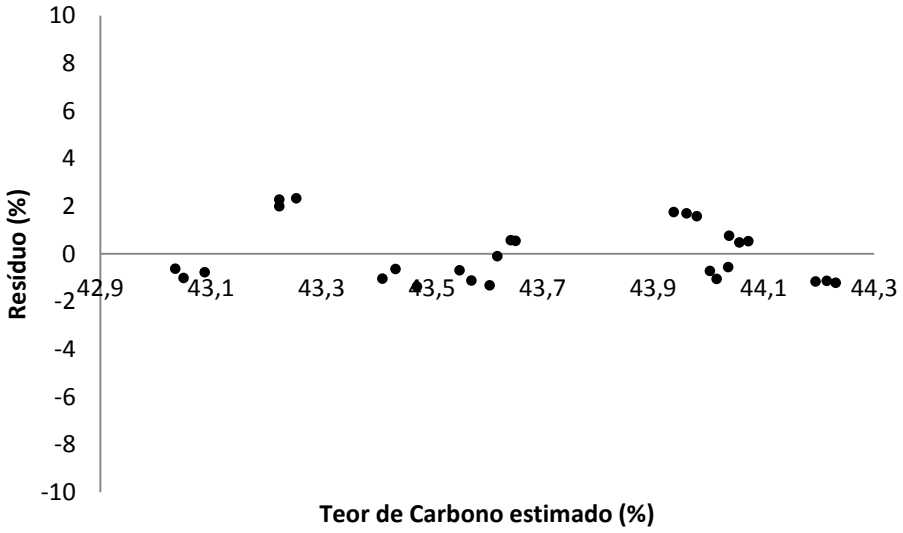



**Figura 11** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de carbono.




Na estimativa do teor de hidrogênio em função do teor de voláteis e de carbono fixo, Tabela 33, observa-se uma contribuição de 51,07% do teor de voláteis e 48,93% do teor de carbono fixo. O combustível ligninocelulósico apresenta teor de hidrogênio na faixa de 6,73 a 7,13%, sendo elemento presente na composição de todas as moléculas da madeira – teor de polissacarídeos, teor de lignina e teor de extrativos.

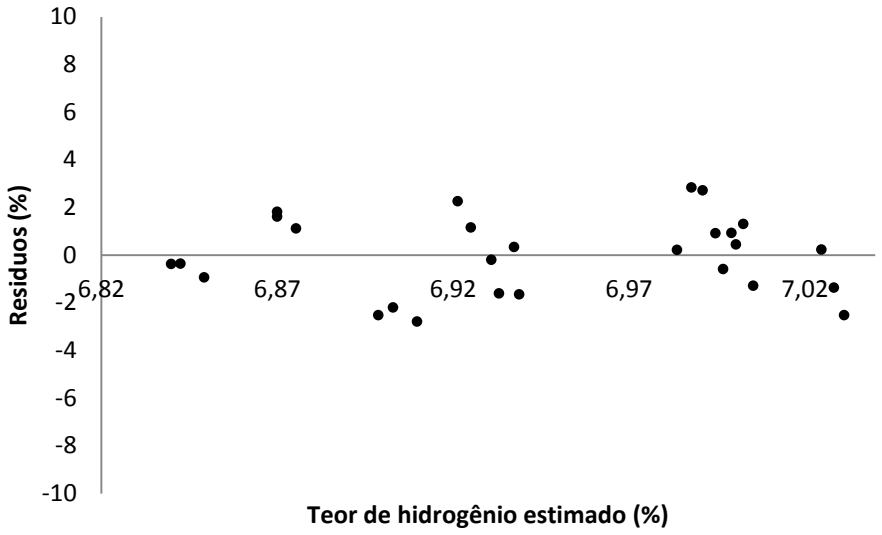
**Tabela 33** – Estatística e coeficiente para a equação do hidrogênio.

| Equação | | | Nº | $R^2$ | EPS | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{H = 0,0714\ TV + 0,0684\ CF}$ | | | 27 | 0,9997 | 0,1150 | 1,66 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | | |
| **Voláteis** | | | **Carbono fixo** | | | |
| Est. t | p-valor | | Est.t | | p-valor | |
| 25,00* | $3,32 \times 10^{-19}$ | | 7,39* | | $9,65 \times 10^{-08}$ | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | | Q-quadrado | p-Valor |
| **Kolmogorov-Smirnov** | 0,09* | 0,88 | **Breusch Pagan** | | 0,05* | 0,83 |

$R^2$ é o coeficiente de determinação, $R^2$ ajustado é o coeficiente de determinação ajustado, EPS é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do hidrogênio. TV: teor de voletéis, CF: carbono fixo. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da análise de resíduos com * são significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

A estimativa do teor de hidrogênio, Tabela 33, resultou em uma equação de regressão significativa, que explica 99,97% dos valores estimados de hidrogênio e com baixo coeficiente de variação da regressão ($S_{yx}$ < 10%). A Figura 12 apresenta a distribuição dos resíduos.

**Figura 12** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio.




Observa-se também uma distribuição normal e homocedástica dos resíduos da regressão, com gráfico (Figura 12) apresentando uma distribuição aleatória dos resíduos e baixa amplitude dos mesmos, o que confirma a adequabilidade do ajuste desta equação aos dados.

### 4.6 Teor de gases (CO, $CO_2$ e $SO_2$) da equação de combustão incompleta, modelagem do consumo de lenha (F) e eficiência (Ef) em função do teor dos gases CO e $CO_2$ e concentração de CO em uma cozinha hipotética.

A combustão é uma reação química de oxidação que se estabelece entre o combustível lignocelulósico (lenha) e o oxigênio, liberando energia térmica na forma de calor e caso seja completa; gás carbônico, dióxido de enxofre e água. A reação de combustão que ocorre nos fogões a lenha são sempre incompletas, decorrentes do fato de que o suprimento de oxigênio provêm do ar que contem em torno de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Desta forma, a queima incompleta do carbono produz monóxido de carbono que é um componente tóxico das reações de combustão incompleta. Na Tabela 34 encontram-se os dados de consumo de lenha, eficiência e concentração dos gases da combustão incompleta (CO, $CO_2$ e $SO_2$) para o fogão à lenha.

**Tabela 34** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação do Consumo de lenha, Eficiência e volume de CO, $CO_2$ $SO_2$ da combustão incompleta.

| Espécies | F (kg/h) | Ef (%) | CO ($Nm^3/kg$) | $CO_2$ ($Nm^3/kg$) | $SO_2$ ($Nm^3/kg$) |
|---|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 0,97±0,26 (26,73) | 14,10±1,14 (8,10) | $0,05±3,48\ 10^{-4}$ (0,69) | $0,67±4,63\ 10^{-3}$ (0,69) | $7,49\ 10^{-5}± 7,41\ 10^{-6}$ (9,90) |
| ***E. propinqua*** | 0,95±0,16 (16,87) | 13,85±1,11 (8,05) | $0,05±2,82\ 10^{-4}$ (0,59) | $0,63±3,75\ 10^{-3}$ (0,59) | $5,13\ 10^{-5}± 1,11\ 10^{-5}$ (21,71) |
| ***E. pellita*** | 0,79±0,13 (16,82) | 15,01±0,87 (5,80) | $0,05±2,78\ 10^{-4}$ (0,57) | $0,65±3,69\ 10^{-3}$ (0,57) | $3,07\ 10^{-5}± 2,02\ 10^{-5}$ (65,89) |
| ***E. tereticornis*** | 1,01±0,09 (8,83) | 11,06±0,34 (3,09) | $0,05±8,63\ 10^{-5}$ (0,18) | $0,63±1,15\ 10^{-3}$ (0,18) | $6,15\ 10^{-5}± 8,77\ 10^{-6}$ (14,26) |
| ***E. urophylla*** | 1,01±0,18 (17,37) | 12,43±0,68 (5,47) | $0,05±2,72\ 10^{-5}$ (0,06) | $0,64±3,61\ 10^{-4}$ (0,06) | $1,02\ 10^{-4}± 1,48\ 10^{-5}$ (14,48) |
| ***E. camaldulensis*** | 0,82±0,12 (15,12) | 14,35±0,73 (5,12) | $0,05±2,23\ 10^{-4}$ (0,48) | $0,62±2,97\ 10^{-3}$ (0,48) | $5,67\ 10^{-5}± 1,00\ 10^{-5}$ (17,69) |
| ***E. urograndis*** | 0,99±0,06 (5,77) | 12,19±0,54 (4,46) | $0,05±5,04\ 10^{-5}$ (0,10) | $0,64±6,69\ 10^{-4}$ (0,10) | $8,02\ 10^{-5}± 8,98\ 10^{-6}$ (11,20) |
| ***C. citriodora*** | 1,23±0,16 (12,87) | 9,39±0,63 (6,69) | $0,05±6,20\ 10^{-5}$ (0,13) | $0,63±8,24\ 10^{-4}$ (0,13) | $6,19\ 10^{-5}± 6,72\ 10^{-6}$ (10,86) |
| ***E. saligna*** | 1,11±0,09 (7,94) | 10,10±0,76 (7,48) | $0,05±3,68\ 10^{-4}$ (0,75) | $0,65±4,89\ 10^{-3}$ (0,75) | $4,98\ 10^{-5}± 3,07\ 10^{-6}$ (6,16) |

Os dados da Tabela 34 foram modelados por meio de equações de regressão linear que estimam o valor do consumo da lenha em função da eficiência e concentração dos gases da queima do carbono (CO e $CO_2$), Tabelas 31 e 32. Devido a não significância da correlação, p-valor maior que 0,05, do teor de dióxido de enxofre com as variáveis: consumo de lenha e eficiência, Tabela 35, não foi possível modelar esses dados por meio de equação de regressão.

**Tabela 35** – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, Enxofre, Nitrogênio, Carbono fixo e Teor de voláteis.

| Variáveis | $SO_2$ (%) | P valor |
|---|---|---|
| **F (kg/h)** | $0,36^{ns}$ | 0,07 |
| **Ef (%)** | $-0,20^{ns}$ | 0,31 |
| **CO ($Nm^3/kg$)** | $0,16^{ns}$ | 0,42 |
| **$CO_2$ ($Nm^3/kg$)** | $0,16^{ns}$ | 0,42 |

O valor da análise do $SO_2$ com $^{ns}$ é não significativo, para o nível de significância de 5% de probabilidade de erro.

O ajuste dos dados está adequado (Tabela 36), havendo significância estatística das variáveis e da equação de regressão pelo teste F da Analise de Variância (ANOVA) bem como significância dos coeficientes da equação pelo teste t de Student, ao nível de probabilidade de erro de cinco por cento.

**Tabela 36** – Análise de variância para as variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **CO** | 1 | 28,88 | 28,88 | 2094,02* | $1,25 \times 10^{-25}$ |
| **Eficiência** | 1 | 0,21 | 0,21 | 15,24* | $6,35 \times 10^{-04}$ |
| **Resíduos** | 25 | 0,34 | 0,01 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

As equações de regressão do consumo de lenha em função da eficiência e gases da queima do carbono são significativas, apresentando alto valor de coeficiente de determinação, tendo coeficiente de variação de regressão ($S_{yx}$) em torno de 10%, o que indica um ajuste adequado aos dados, Tabela 37 e 38.

**Tabela 37** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha em função da eficiência e volume de CO da combustão incompleta.

| Equação | | Nº | $R^2$ | Syx | Syx (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{F = -0,0512Ef + 34,4094\ CO}$ | | 27 | 0,9883 | 0,1174 | 11,36 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | |
| **CO** | | **Eficiência** | | | |
| Est. t | p-valor | Est.t | p-valor | | |
| 10,25* | $1,96 \times 10^{-10}$ | -3,90* | $6,35 \times 10^{-04}$ | | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | GQ* | | p-Valor | |
| **Shapiro-Wilk** | 0,94* | 0,09 | **Goldfeld Quandt** | Ef<br>0,55* | CO<br>0,77* | Ef<br>0,80 | CO<br>0,65 |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do consumo de lenha. Ef: eficiência. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da análise de resíduos com * são significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

O ajuste dos dados está adequado (Tabela 38), havendo significância estatística das variáveis e da equação de regressão pelo teste F da Analise de Variância (ANOVA) bem como significância dos coeficientes da equação pelo teste t de Student, ao nível de probabilidade de erro de cinco por cento.

**Tabela 38** – Análise de variância para as variáveis independentes.

| Variáveis independentes | GL | SQ | QM | Estat. F | p-valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **$CO_2$** | 1 | 1,45 | 1,45 | 104,96* | $1,96 \times 10^{-10}$ |
| **Eficiência** | 1 | 27,64 | 27,64 | 2004,29* | $2,16 \times 10^{-25}$ |
| **Resíduos** | 25 | 0,34 | 0,01 | | |

GL: grau de liberdade. SQ: soma dos quadrados. QM: quadrado médio. Os valores da estatística do Teste F com * são significativos, para o nível de significância de 5%.

A estimativa do consumo de lenha apresenta correlação negativa com a eficiência, Tabela 39. O aumento da eficiência do fogão promove um menor consumo de lenha e desta

forma uma economia no uso do combustível. No que se refere aos gases provenientes da queima incompleta da lenha o teor de monóxido de carbono tem uma influencia 13 vezes maior (coeficiente de 34,4094) no valor do consumo de lenha que o teor de gás carbônico (coeficiente de 2,5896), isso indica que o uso deste fogão em ambientes residenciais não é apropriado sem a presença de uma chaminé que direcione o gás tóxico (CO) para fora da residência. Já em condições externas a própria circulação de ar dissipará o monóxido de carbono diminuindo o risco de contaminação ao usuário do fogão.

**Tabela 39** – Estatística e coeficiente para a equação do consumo de lenha em função da eficiência e volume de CO2 da combustão incompleta.

| **Equação** | | | **Nº** | **$R^2$** | **Syx** | **Syx (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{F = -0,0512\ Ef + 2,5896\ CO_2}$ | | | 27 | 0,9883 | 0,1174 | 11,36 |
| **Significância dos coeficientes da equação** | | | | | | |
| **$CO_2$** | | | **Eficiência** | | | |
| Est. t | p-valor | | Est.t | | p-valor | |
| 10,25* | $1,96 \times 10^{-10}$ | | -3,90* | | $6,35 \times 10^{-04}$ | |
| **Análise de Resíduo da Regressão** | | | | | | |
| ***Teste de Normalidade*** | | | ***Teste de Homocedasticidade*** | | | |
| **Tipo de teste** | Est. D | p-Valor | **Tipo de Teste** | GQ | | p-Valor | |
| **Shapiro-Wilk** | 0,94* | 0,09 | **Goldfeld Quandt** | Ef<br>0,55* | CO<br>0,77* | Ef<br>0,80 | CO<br>0,65 |

Nº é o número de observações, $R^2$ é o coeficiente de determinação, Syx é erro padrão da estimativa, Syx (%) é o erro padrão da estimativa em porcentagem, calculado pela razão entre o erro padrão da estimativa pelo valor médio do consumo de lenha. Ef: eficiência. Os valores dos coeficientes da equação com * são significativos para p-valor menor que 5 %. Os valores da análise de resíduos com * são significativos, para o nível de significância alfa de 5%. Indício de um ajuste adequado ocorre para o coeficiente de determinação próximo ao valor um e Syx de até 10%.

Os pressupostos da análise de regressão foram atendidos, ocorrendo distribuição normal e homocedasticidade dos resíduos da regressão. O gráfico dos resíduos em função da variável estimada (consumo de lenha) apresentam padrão aleatório de baixa amplitude, condizente com o esperado de um ajuste adequado aos dados, Figura 13 e 14.

**Figura 13** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio

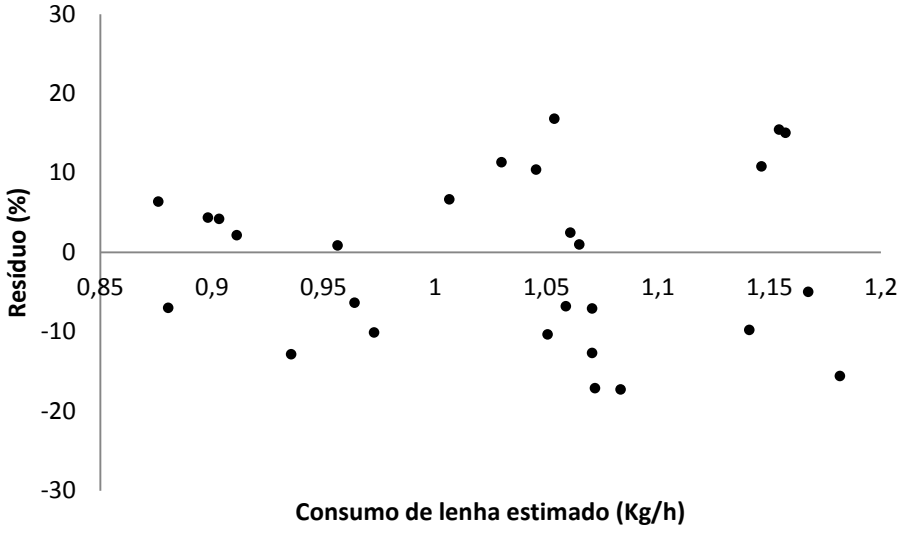
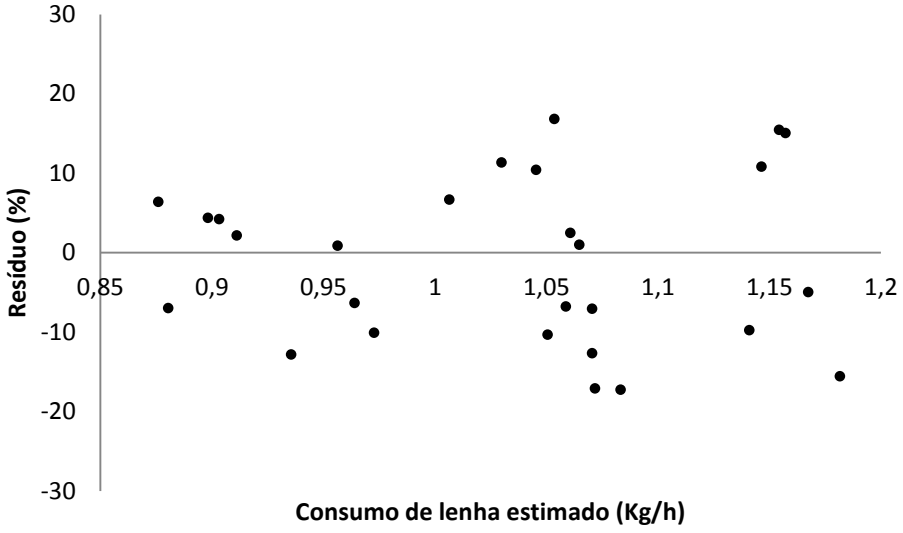



**Figura 14** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do consumo de lenha.




### 4.7 Concentração máxima e média de CO e emissão de CO

Nos fogões ocorre combustão incompleta da lenha, emitindo gases tóxicos no ambiente em que o fogão está instalado, normalmente em uma cozinha, bem como na atmosfera. Na Tabela 40 foi estimada a Concentração máxima e média (Cmáx e Cméd) do gás monóxido de carbono e o Potencial de Exposição (E) ao gás pelo usuário do fogão em uma cozinha hipotética.

**Tabela 40** – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da [CO] máxi, [CO] méd e E da cozinha..

| Espécies | [CO] máx (mg/m³) | [CO] méd (mg/m³) | %E (h-mg/m³) | %E (h-mg/m³) acima da norma (40 h- mg/m³) |
|---|---|---|---|---|
| ***E. grandis*** | 102,38±0,70 bc (0,69) | 95,56±0,66 bc (0,69) | 95,56±0,66 bc (0,69) | 138,89±1,64 (1,18) |
| ***E. propinqua*** | 93,71±0,56 cb (0,59) | 87,47±0,53 cd (0,59) | 87,47±0,53 cd (0,59) | 188,67±1,30 (1,09) |
| ***E. pellita*** | 83,09±0,47 d (0,57) | 77,55±0,44 d (0,57) | 77,55±0,44 d (0,57) | 93,88±1,11 (1,18) |
| ***E. tereticornis*** | 99,58±0,18 bc (0,18) | 92,95±0,17 bc (0,18) | 92,95±0,17 bc (0,18) | 132,36±0,42 (0,32) |
| ***E. urophylla*** | 101,84±0,06 bc (0,06) | 95,05±0,05 bc (0,06) | 95,05±0,05 bc (0,06) | 137,62±0,13 (0,10) |
| ***E. camaldulensis*** | 80,01±0,38 d (0,48) | 74,68±0,36 d (0,48) | 74,68±0,36 d (0,48) | 86,70±0,89 (1,03) |
| ***E. urograndis*** | 99,64±0,10 bc (0,10) | 93,00±0,10 bc (0,10) | 93,00±0,10 bc (0,10) | 132,49±0,24 (0,18) |
| ***C. citriodora*** | 122,30±0,16 a (0,13) | 114,14±0,15 a (0,13) | 114,14±0,15 a (0,13) | 185,36±0,37 (0,20) |
| ***E. saligna*** | 113,10±0,85 ab (0,75) | 105,56±0,80 ab (0,75) | 105,56±0,80 ab (0,75) | 163,90±1,99 (1,22) |

A norma da Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece o limite máximo que o usuário do fogão pode estar exposto ao gás monóxido de carbono. Geralmente as diferentes refeições (café da manhã, almoço e jantar) requerem um tempo médio de uma hora de uso do fogão por refeição, para este tempo é fixado um limite de potencial de exposição de 40 h-mg/m³ de monóxido de carbono. O fogão aprimorado com chaminé alongada possui um potencial de exposição ao gás CO 62% maior que a norma da OMS, enquanto que o fogão tradicional é de 550%. Desta forma, ambos os fogões apresentam um nível de exposição maior que o estabelecido pela OMS, porém em menor nível no fogão aprimorado (Tabela 41).

No entanto, o fogão aprimorado com chaminé alongada libera uma concentração de monóxido de carbono e potencial de exposição ao gás 75% menor que o fogão tradicional. Nas Figuras 15 e 16 observa-se que a concentração de monóxido de carbono liberado depende do tipo de lenha.

**Figura 15** – Gráfico da distribuição da [CO] máximo e médio das diferentes espécies.

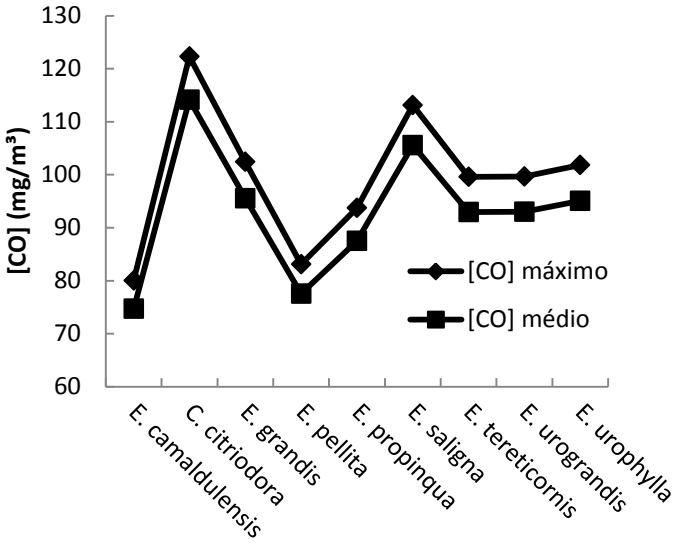
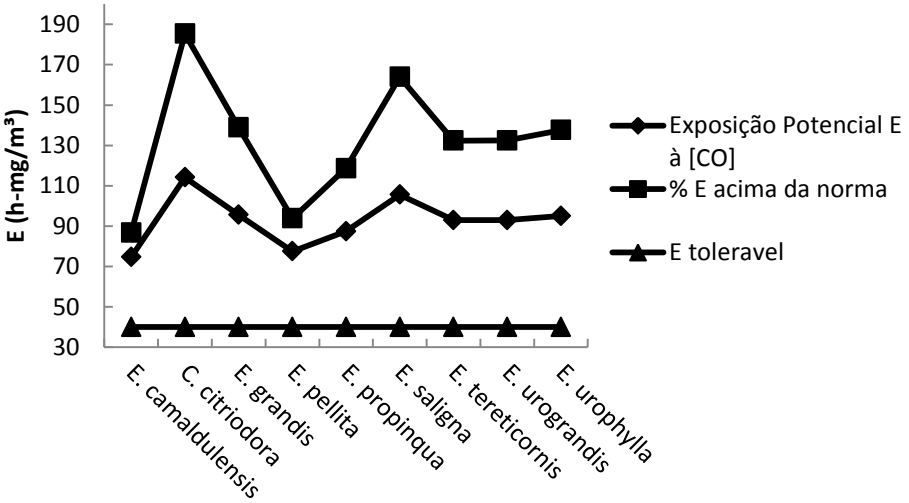



**Figura 16** - Distribuição dos resíduos em função dos valores experimentais do teor de hidrogênio



Observa-se também que a concentração e nível de potencial de exposição ao monóxido de carbono dependem do tipo de fogão utilizado, Tabela 41. As concentrações máxima e média de monóxido de carbono e o potencial de exposição do fogão aprimorado com chaminé curta e alongada apresentaram valores equivalentes de redução no teor de monóxido de carbono, sendo de 63% e 75%, respectivamente.

**Tabela 41** – Comparação entre o fogão à lenha aprimorado e o fogão à lenha tradicional em relação a [CO] na queima de *Eucalyptus grandis.*

| Espécies | [CO] máx (mg/m³) | [CO] méd (mg/m³) | %E (h-mg/m³) |
|---|---|---|---|
| **Fogão à lenha aprimorado com chaminé curta** | 102,38±0,70 b (0,69) | 95,56±0,66 b (0,69) | 95,56±0,66 b (0,69) |
| **Fogão à lenha aprimorado com chaminé alongada** | 69,28±0,48 c (0,69) | 64,66±0,44 c (0,69) | 64,66±0,44 c (0,69) |
| **Fogão à lenha tradicional** | 278,52±1,91 a (0,69) | 259,95±1,79 a (0,69) | 259,95±1,79 a (0,69) |

Desta forma, o fogão aprimorado além de ser mais eficiente e potente, consumindo menos lenha no seu funcionamento, também promove uma menor liberação do gás tóxico monóxido de carbono, o que aumenta a segurança do usuário do fogão.

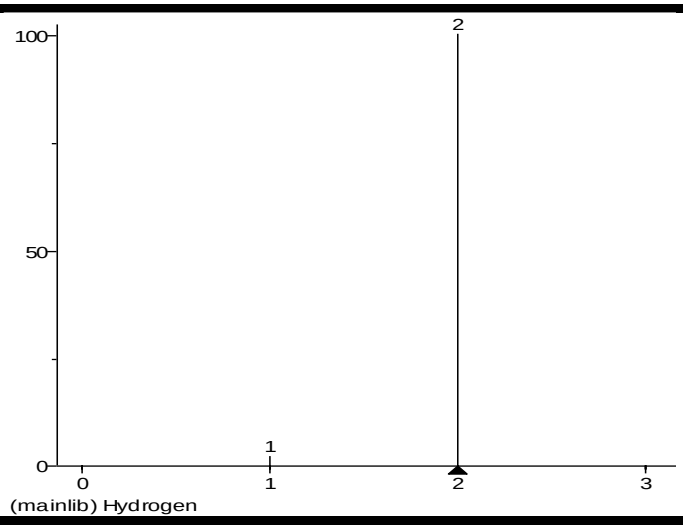
### 4.8 Curvas de análise dos gases de combustão do fogão aprimorado e do fogão tradicional.

As análises de Espectrometria de Massas dos gases e voláteis da combustão, dos fogões à lenha, tiveram por objetivo principal a identificação das substancias CO, $CO_2$, $N_2$, $H_2$ e $H_2O$. Adicionalmente, caracterizar a emissão de gases, visando o controle de poluição na queima da lenha no fogão aprimorado de chaminé curta e no fogão tradicional. Na Figura 17 são apresentados os espectros de massa dos compostos alvos da queima incompleta da lenha, com seus respectivos picos característicos de abundância relativa.

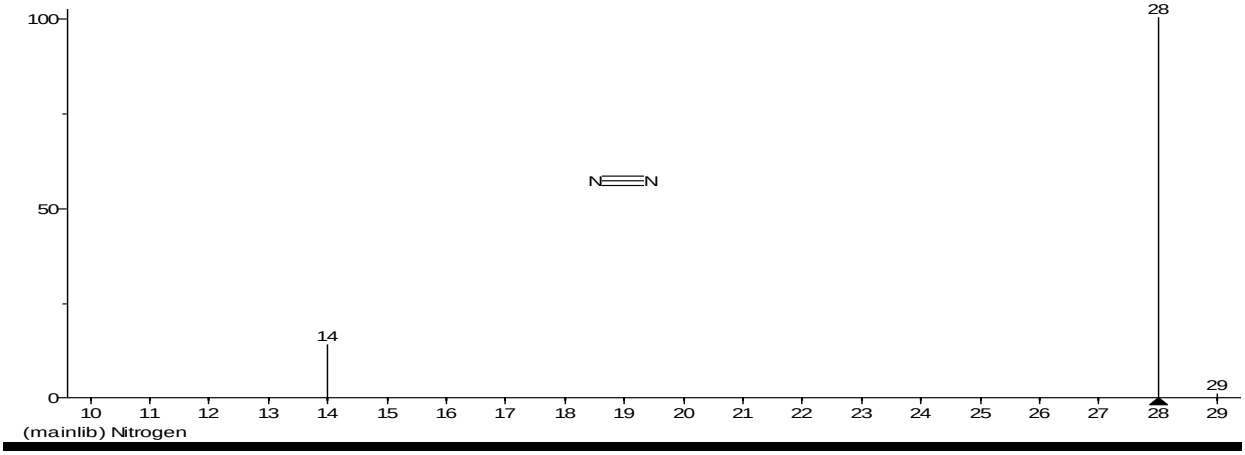
**Figura 17** - Espectro de massa dos compostos presentes na combustão incompleta da lenha.

**(continua)**

**Espectro de massa do composto $H_2$**




**Espectro de massa do composto $N_2$**




**Espectro de massa do composto CO**

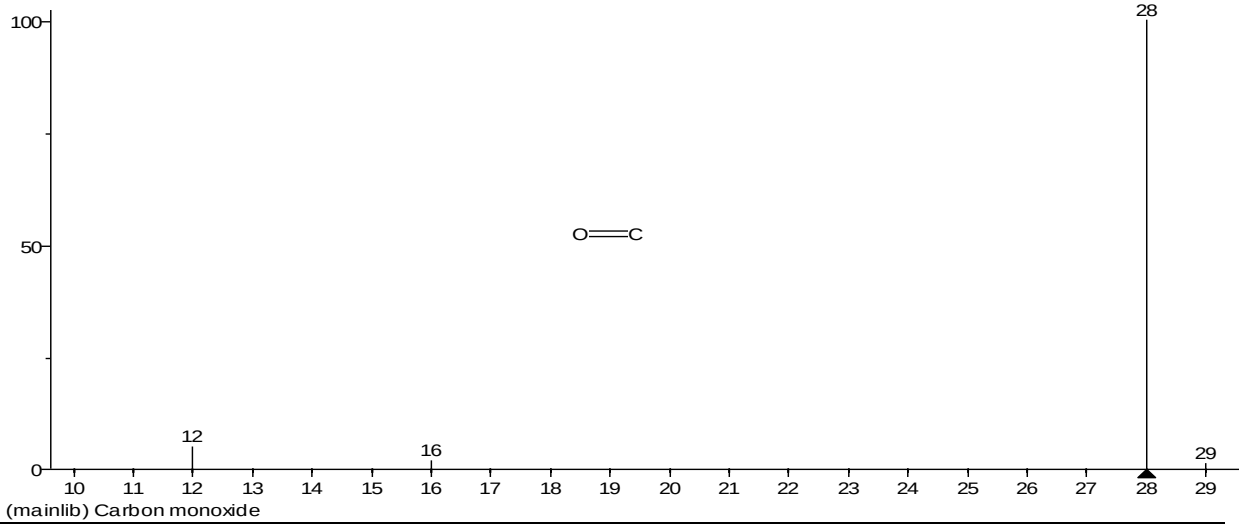
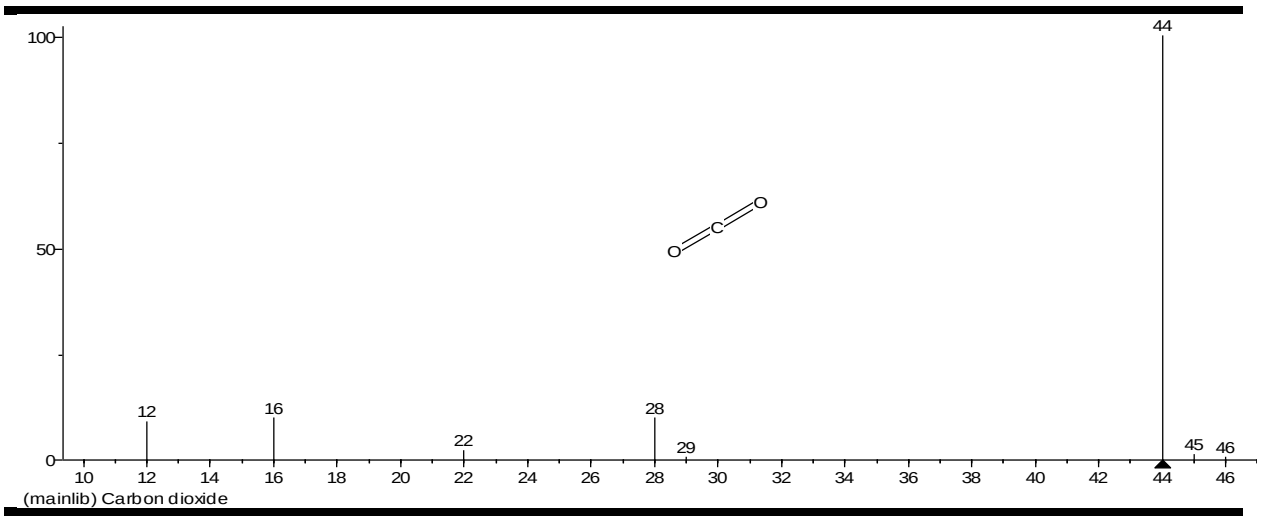
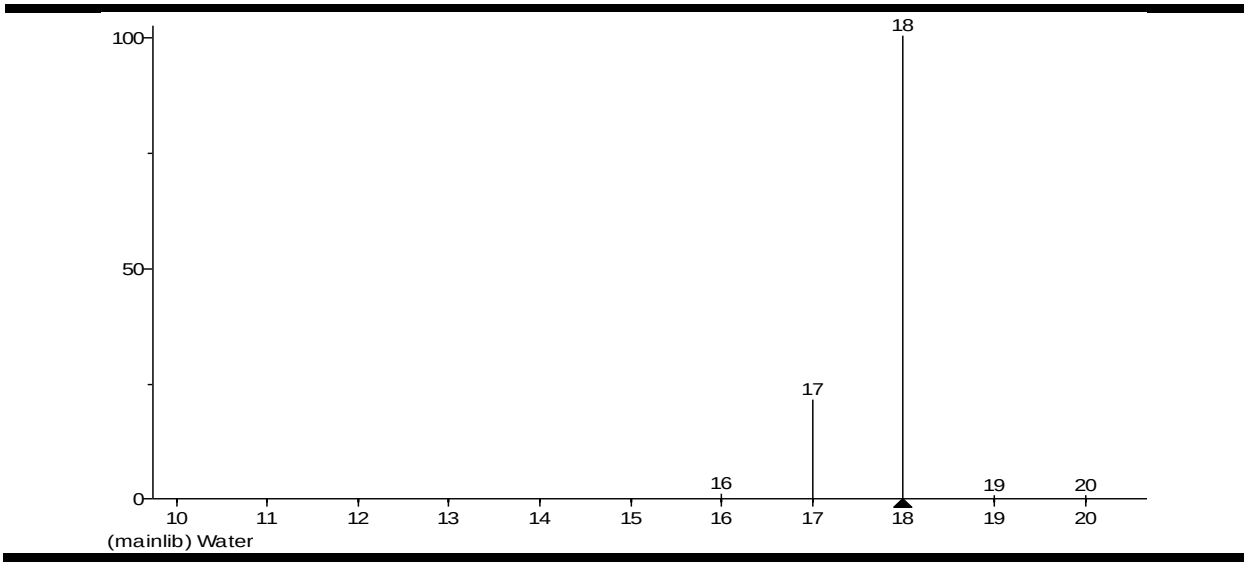


**Figura 17** - Espectro de massa dos compostos presentes na combustão incompleta da lenha.
**(conclusão)**

**Espectro de massa do composto $CO_2$**




**Espectro de massa do composto $H_2O$**

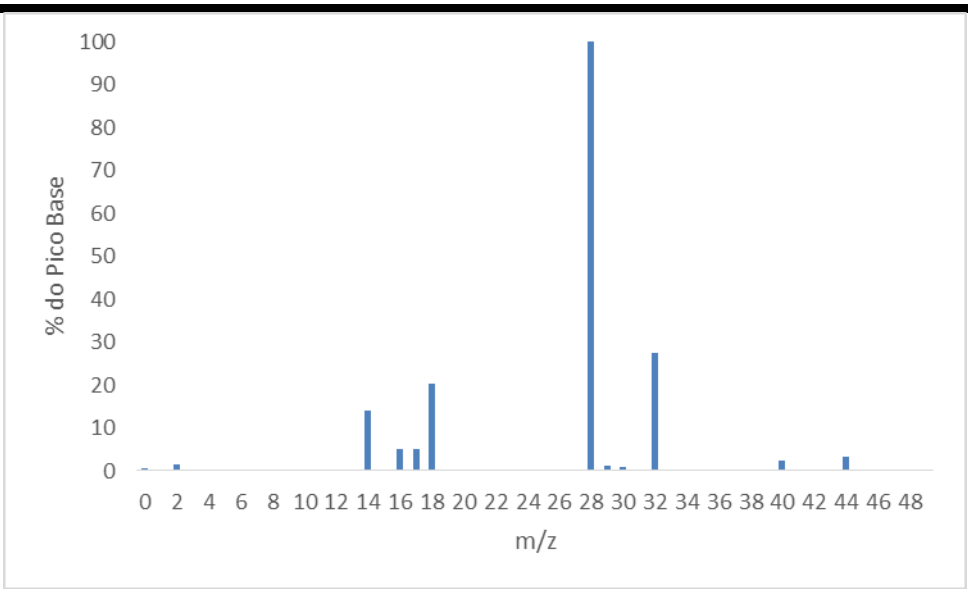



Como a combustão dos fogões à lenha não são completas, pois não se opera com excesso de ar, espera-se que ocorra grande produção de CO e $H_2$ além dos gases $CO_2$ e $H_2O$. Na Figura 19 são apresentados os espectros de massa do produto da combustão do fogão à lenha aprimorado com chaminé curta e tradicional. A posição dos picos foi identificada por meio dos espectros da Figura 18.

**Figura 18** – Espectro de massa dos compostos da combustão incompleta.

**(continua)**

**Espectro de massa fogão aprimorado**



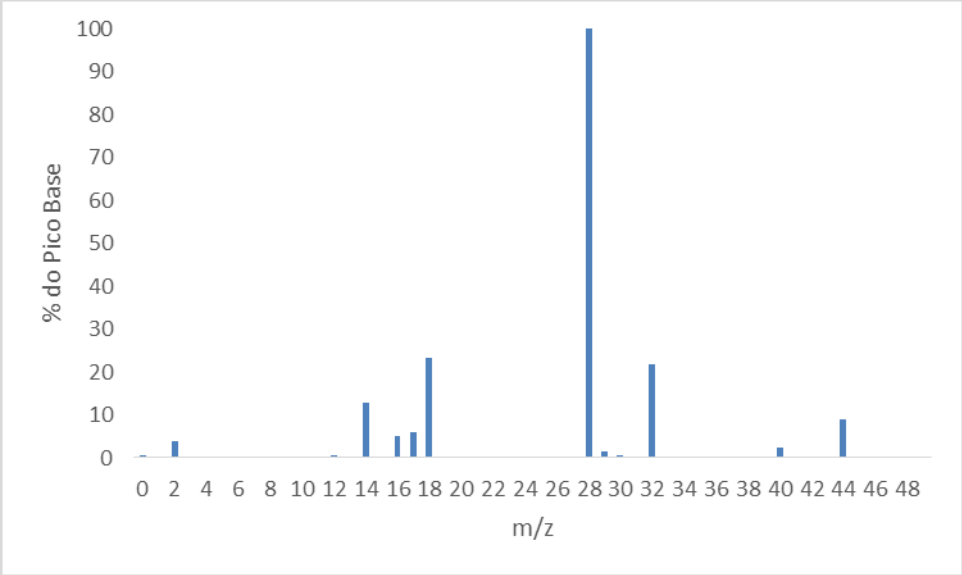
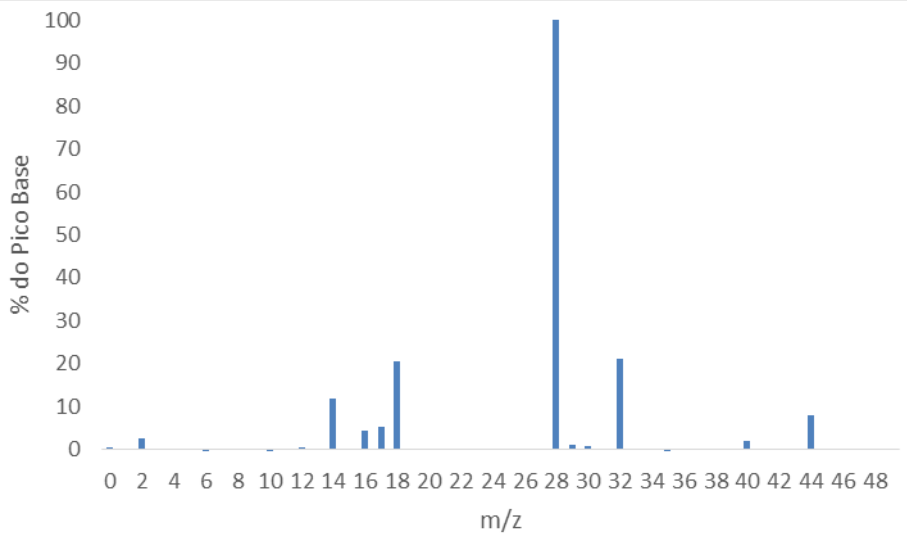



**Figura 18** – Espectro de massa dos compostos da combustão incompleta.

**(continuação)**

**Espectro de massa fogão aprimorado**



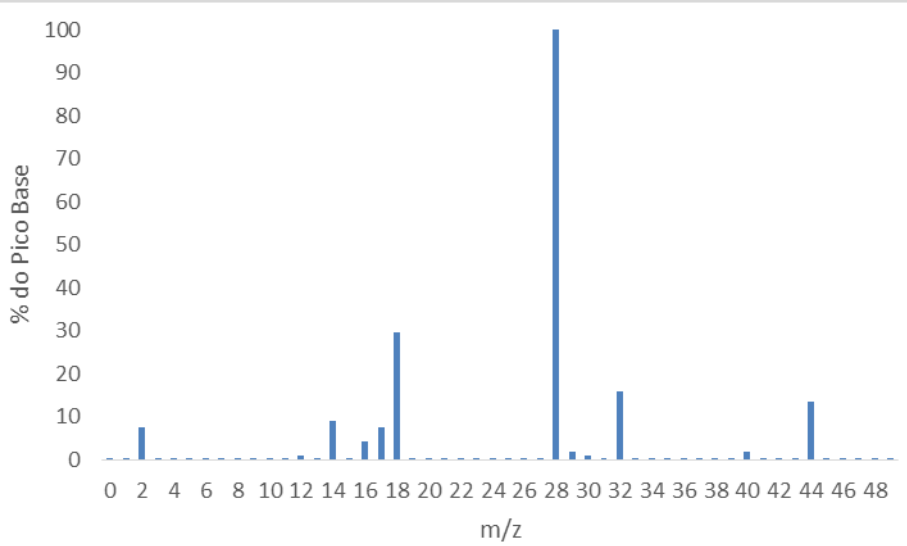
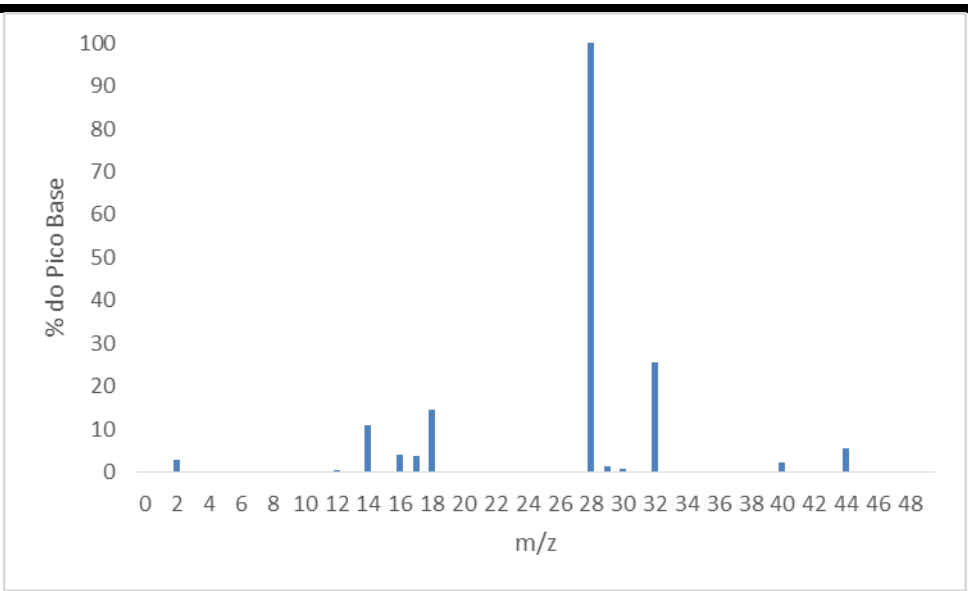



**Figura 18** – Espectro de massa dos compostos da combustão incompleta.

**(continuação)**

**Espectro de massa fogão tradicional**



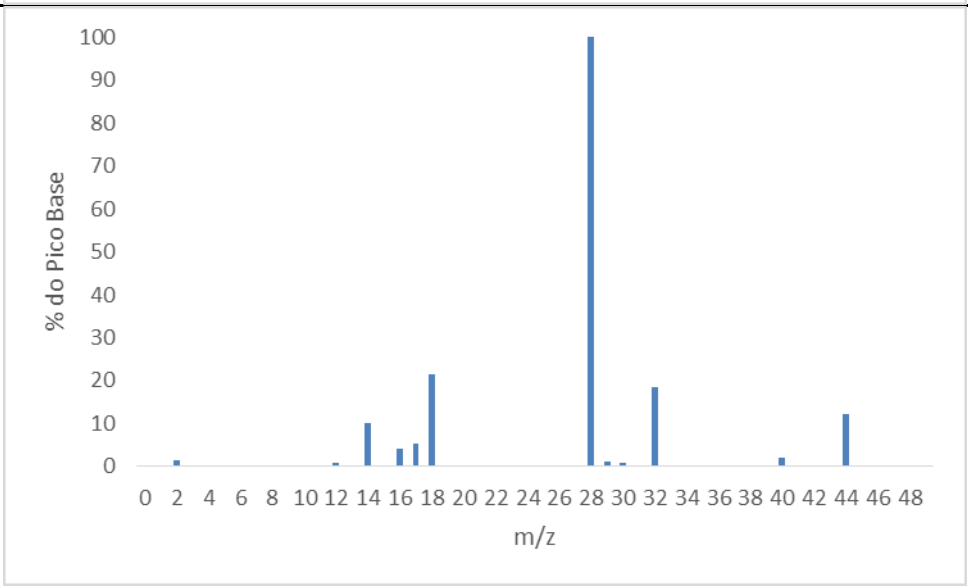
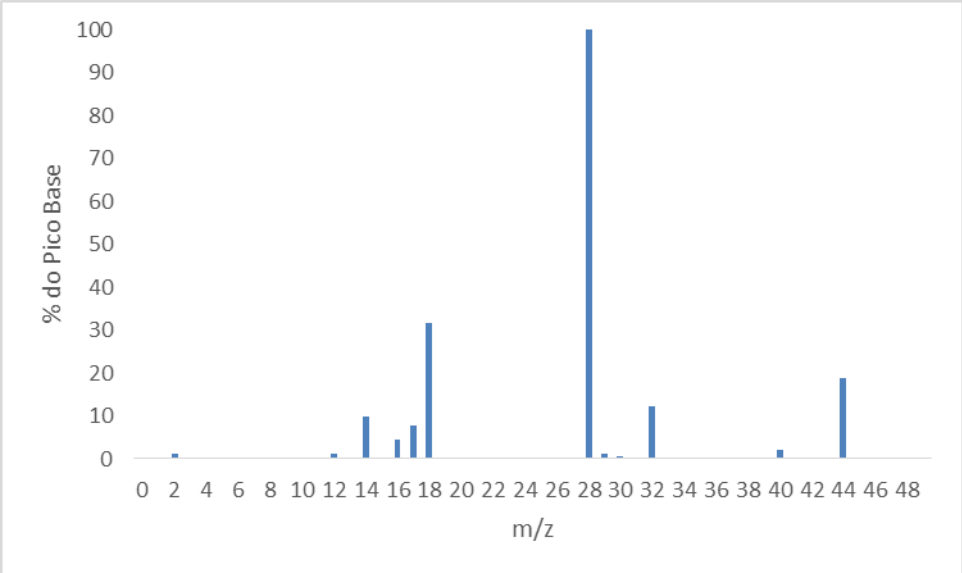
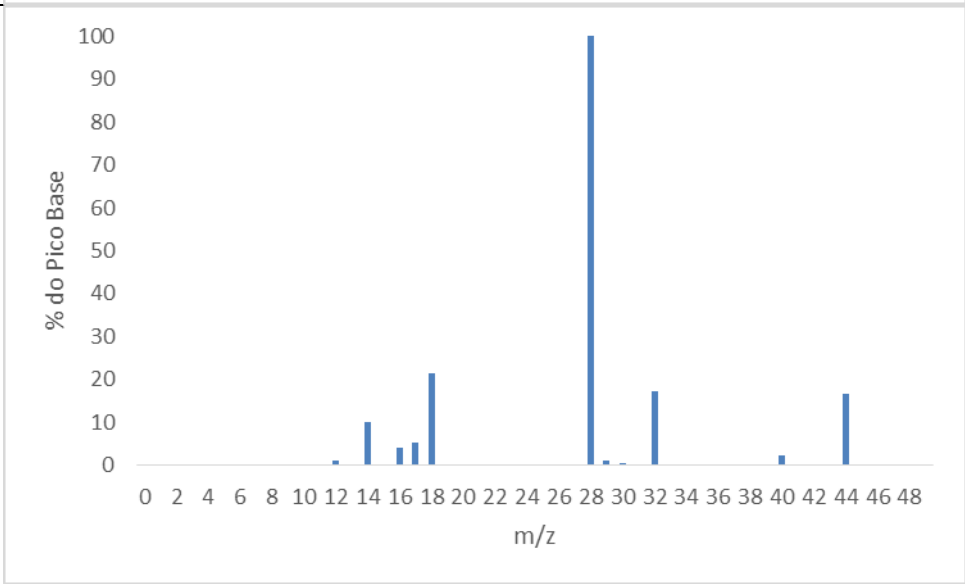



**Figura 18** – Espectro de massa dos compostos da combustão incompleta.
**(conclusão)**

**Espectro de massa fogão tradicional**




Os produtos da combustão incompleta (CO, $H_2O$, $CO_2$ e $H_2$) geram picos característicos no espectro massa, Tabela 42. No entanto, sendo o nitrogênio parte da composição do ar da combustão, em uma concentração da ordem de 79%, e não atuando como reagente no processo, o mesmo não gera picos característicos no espectro de massa. Por terem a mesma massa molar, os espectros de massa do $N_2$ e CO são praticamente indistinguíveis; contudo, a estabilização da linha de base sem ocorrência de picos é um forte indicativo da presença exclusiva de nitrogênio. Porém, o pico na razão m/z igual a 12 só ocorre no espectro do CO, o qual foi utilizado como referência para diferenciá-los. Usando

como referência a presença de CO e $CO_2$, observa-se a ocorrência de queima mais limpa no fogão aprimorado (ocorrência m/z = 12) quando comparado ao fogão tradicional (alta ocorrência m/z = 12).

**Tabela 42** – Localização dos picos característicos do espectro de massas.

| Composto | Razão massa/carga característica |
|---|---|
| **$H_2$** | 1, 2 (intenso) |
| **$N_2$** | 14, 28 (intenso), 29 |
| **CO** | 12, 16, 28 (intenso), 29 |
| **$CO_2$** | 12, 16, 22, 28, 29, 44 (intenso), 45, 46 |
| **$H_2O$** | 16, 17, 18 (intenso), 19, 20 |

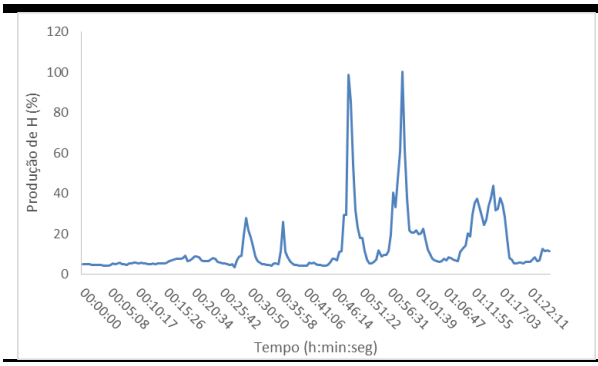
Na Figura 19 se encontra os gráficos da produção dos gases $CO_2$, $H_2O$, $N_2$/CO e $H_2$ em função do tempo de queima da lenha no fogão. Os espectros de massa indicam qual dos fogões apresenta uma queima mais limpa, uma vez que em ambos ocorre a combustão incompleta da lenha; demostrando assim qualitativamente, que o fogão que libera uma menor concentração de CO e maior concentração de $CO_2$ seria um fogão de queima mais limpa.

O primeiro pico que ocorre no gráfico dos gases da combustão está diretamente relacionado ao início da queima da lenha em um determinado tempo, com formação dos compostos da combustão tais como, $CO_2$ (2 a 11 minutos para o fogão aprimorado e de 15 a 50 minutos para o fogão tradicional), $H_2O$ (4 a 12 minutos para o fogão aprimorado e de 25 a 50 minutos para o fogão tradicional) e $H_2$ (7 a 10 minutos para o fogão aprimorado e de 25 a 56 minutos para o fogão tradicional). Verifica-se desta forma que o inicio da combustão nos fogões tradicionais levam um tempo consideravelmente maior que o fogão aprimorado.

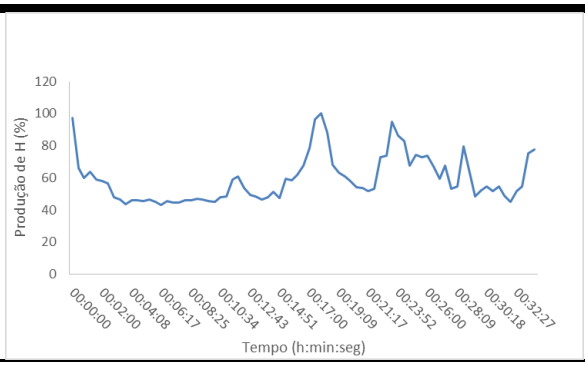
**Figura 19** – Produção dos gases da combustão incompleta.

**(continua)**

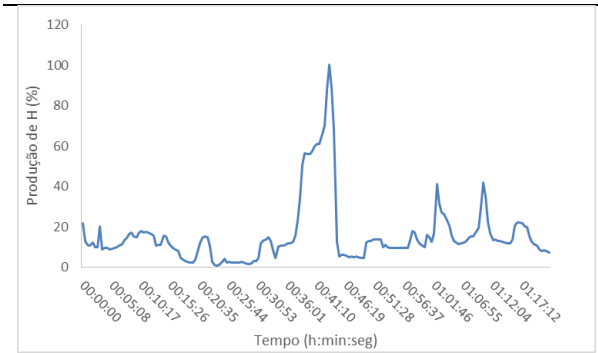
**Hidrogênio**



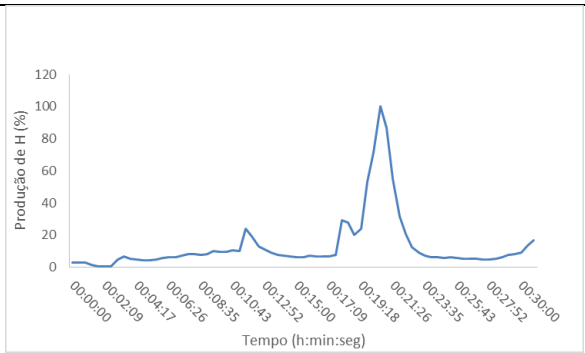

**Fogão tradicional**



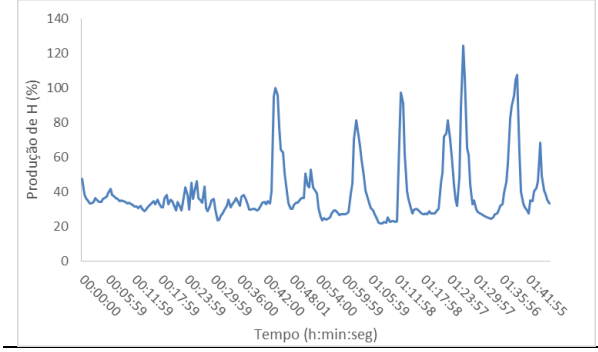

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



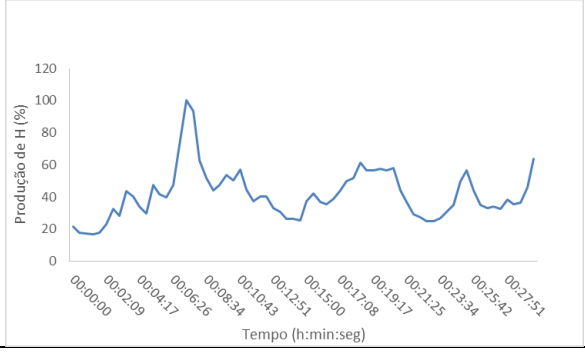

**Fogão tradicional**



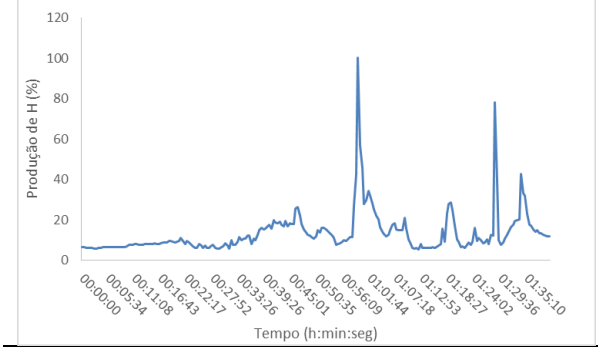

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



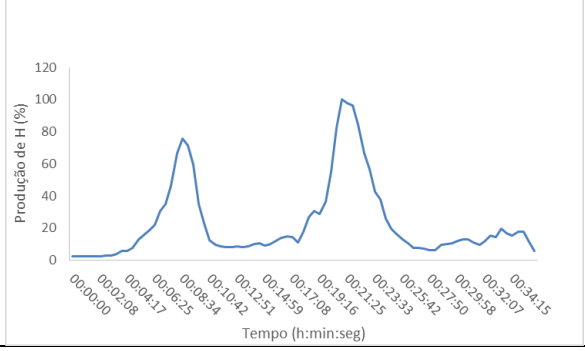

**Fogão tradicional**




**Fogão aprimorado com chaminé curta**




**Fogão tradicional**

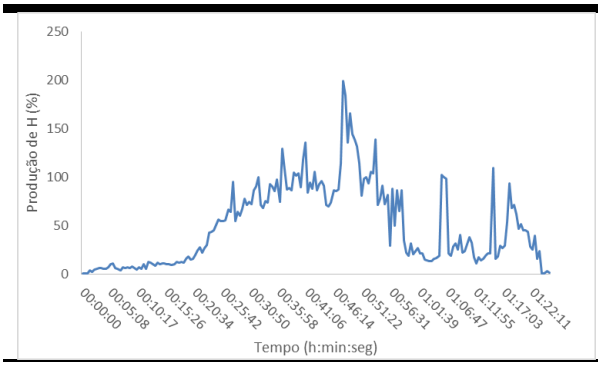



**Fogão aprimorado com chaminé curta**

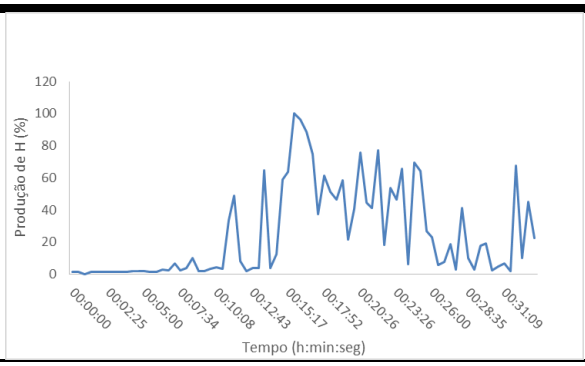
**Figura 19** – Produção dos gases da combustão incompleta.

**(continuação)**

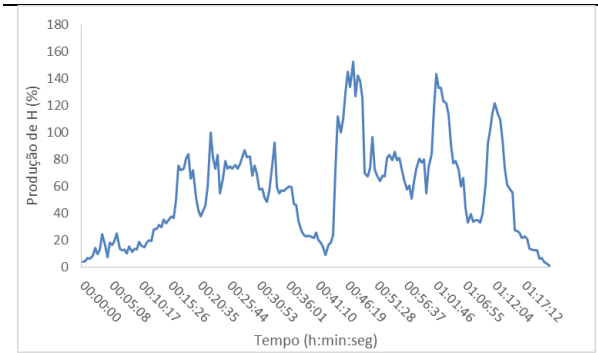
**$CO_2$**



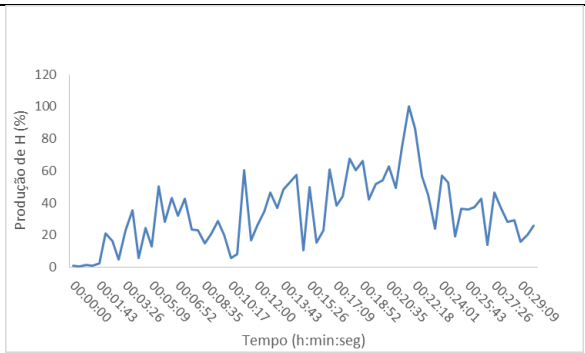

**Fogão tradicional**



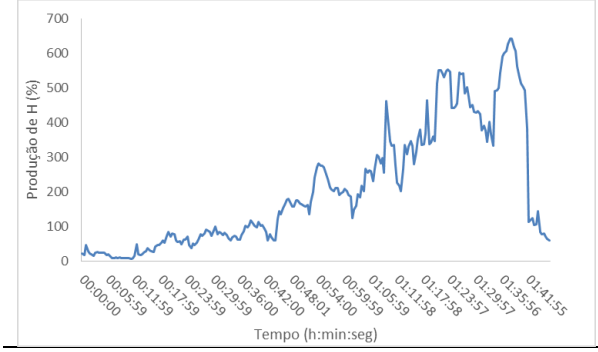

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



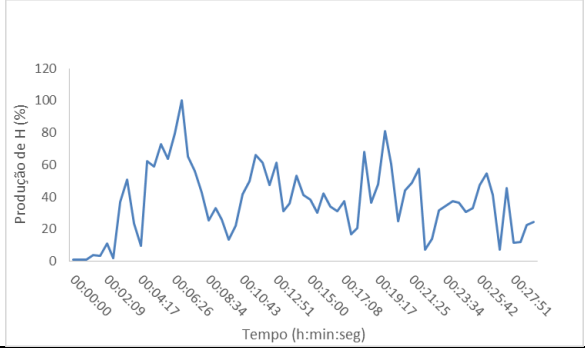

**Fogão tradicional**



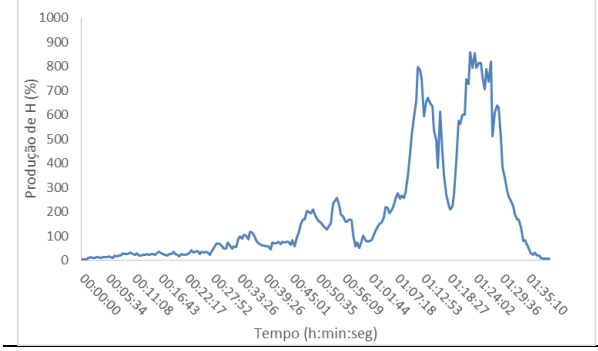

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



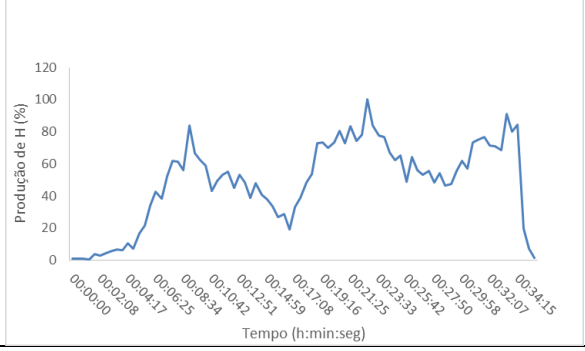

**Fogão tradicional**




**Fogão aprimorado com chaminé curta**




**Fogão tradicional**

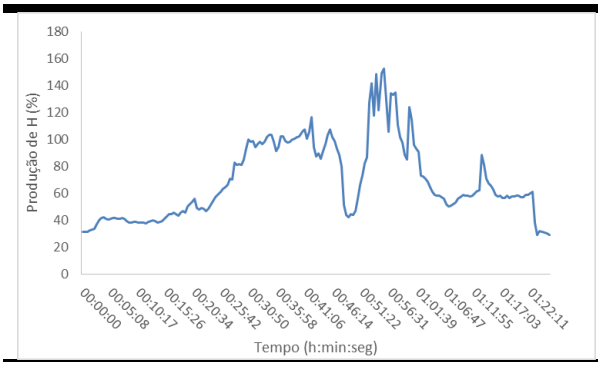



**Fogão aprimorado com chaminé curta**

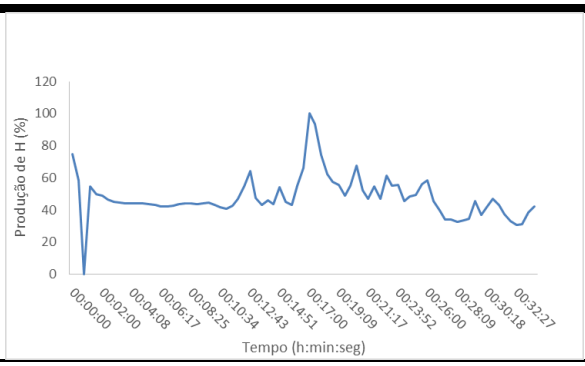
**Figura 19** – Produção dos gases da combustão incompleta.

**(continuação)**

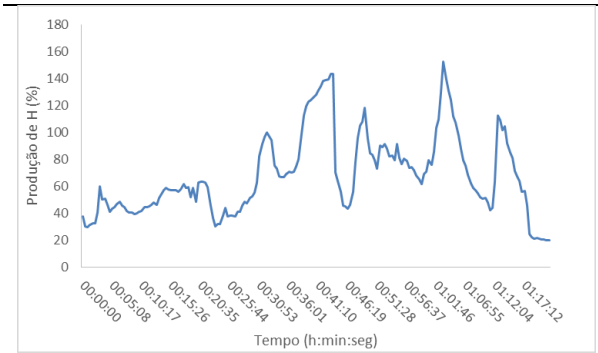
**$H_2O$**



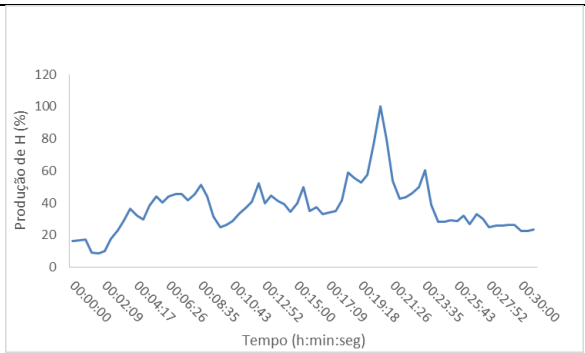

**Fogão tradicional**



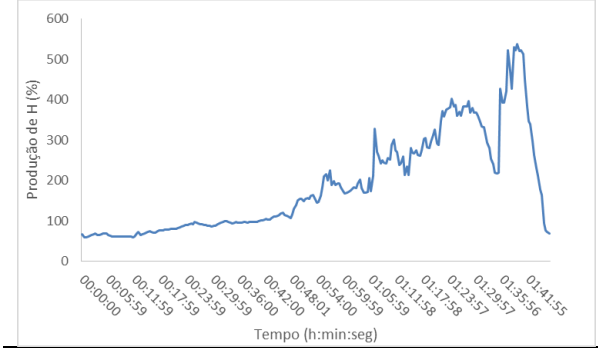

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



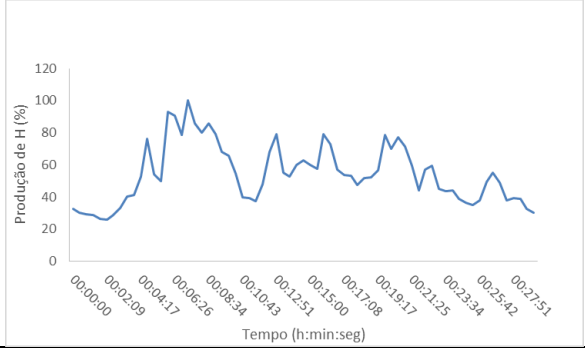

**Fogão tradicional**



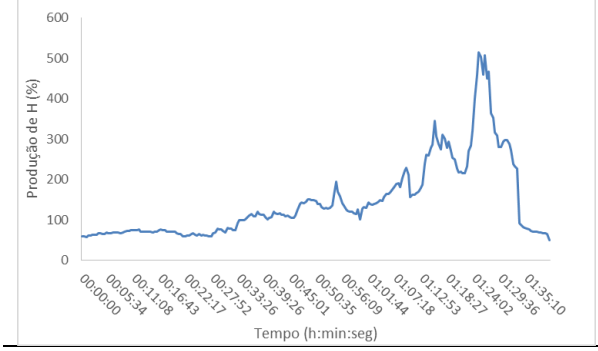

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



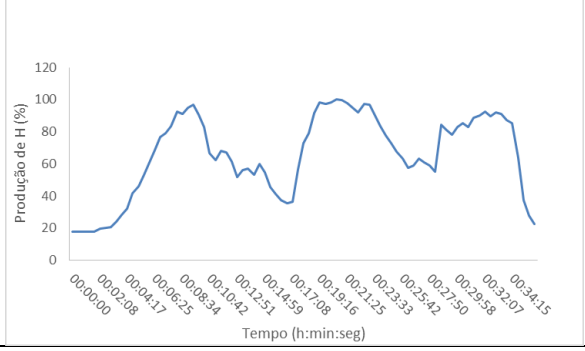

**Fogão tradicional**




**Fogão aprimorado com chaminé curta**




**Fogão tradicional**

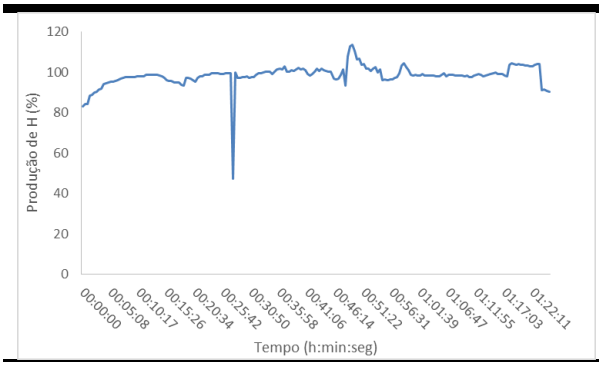



**Fogão aprimorado com chaminé curta**

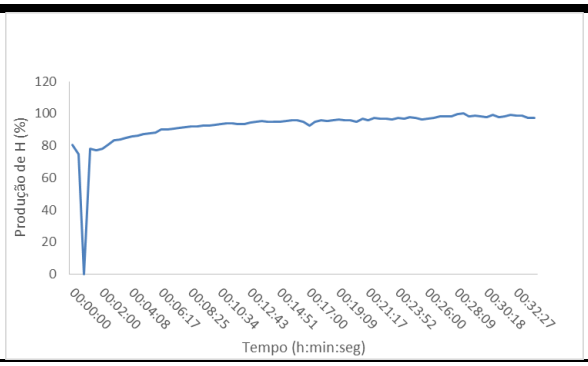
**Figura 19** – Produção dos gases da combustão incompleta.

**(conclusão)**

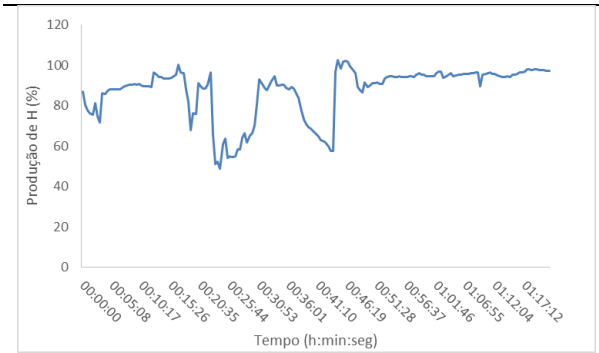
**Nitrogênio – CO**



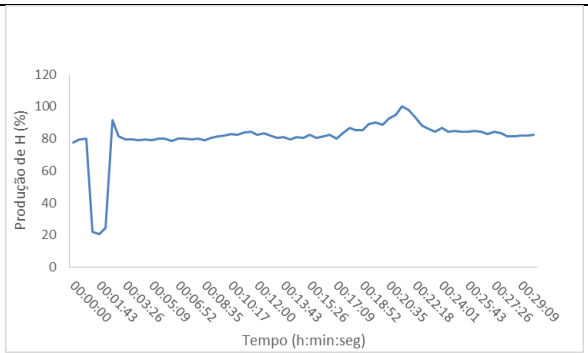

**Fogão tradicional**



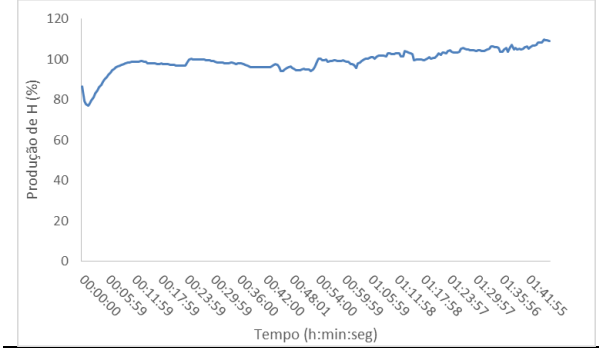

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



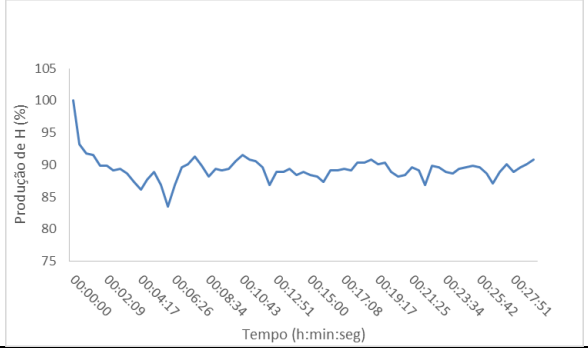

**Fogão tradicional**



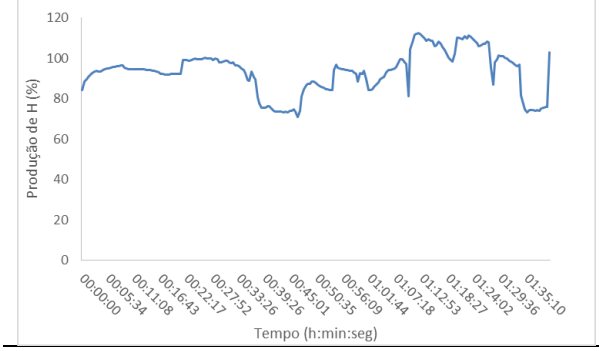

**Fogão aprimorado com chaminé curta**



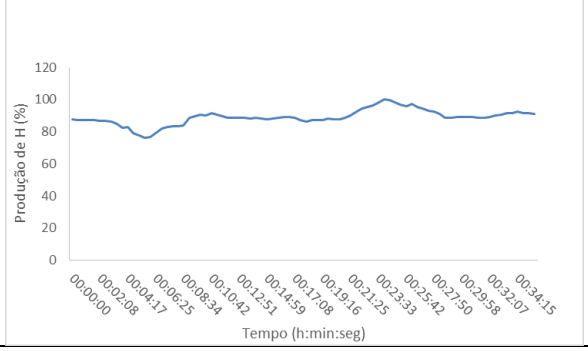

**Fogão tradicional**




**Fogão aprimorado com chaminé curta**




**Fogão tradicional**




**Fogão aprimorado com chaminé curta**

No entanto, sendo o nitrogênio um gás inerte presente no ar da combustão e não representando assim um produto da reação, a não ocorrência de pico nos espectros de $N_2$ – CO é um indicativo de que não houve produção de monóxido de carbono e sim somente a ocorrência do gás nitrogênio (espectros 1, 3 e 4 do fogão aprimorado e espetros 3 e 4 do fogão tradicional). Indícios de ocorrência da produção de monóxido de carbono verificaram-se para o primeiro (45 a 60 minutos) e segundo (46 a 51 minutos) espectro para o fogão tradicional e em apenas um espectro (segundo) para o fogão aprimorado (18 a 24 minutos). Esses resultados indicam uma menor produção de monóxido de carbono no fogão aprimorado, o que confirma uma queima mais limpa da lenha.

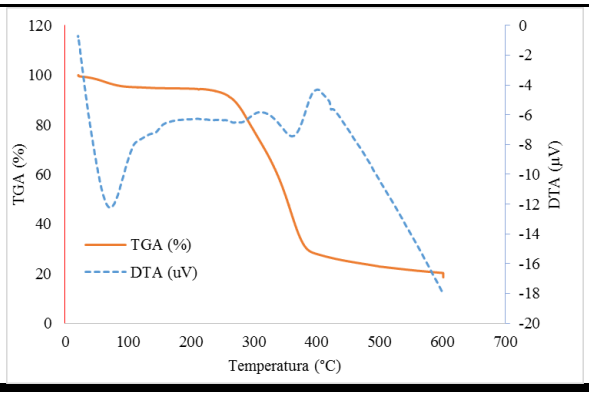
### 4.9 Análise termogravimétrica (TGA) e calorimétrica (DTA) das lenhas de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*

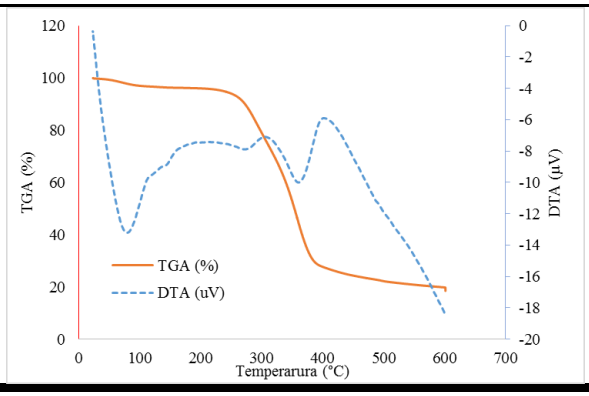
Na Figura 20 estão as curvas de TGA e DTA das lenhas utilizadas nos fogões. Nas curvas de TGA, todas as amostras de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora* apresentaram uma perda de massa inicial de aproximadamente 5% até a temperatura de 100°C, relativo à perda de umidade das amostras. Entre as temperaturas de 100°C a 400°C, as curvas apresentam uma inclinação acentuada decorrente de uma grande perda de massa, em torno de 75%, devido à degradação térmica das macromoléculas celulose, hemiceluloses e lignina. Todas as amostras não se degradaram completamente até a temperatura de 600°C, produzindo em torno de 20 % de resíduo sólido rico em compostos inorgânicos e material pirolisado. O resíduo é gerado principalmente da degradação térmica da lignina, o que produz um material carbonáceo intitulado carvão vegetal ou coque.

**Figura 20** – Curvas termogravimétricas da lenha.

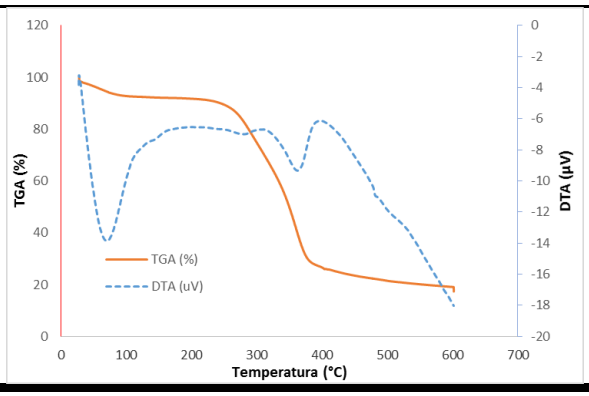
**(continua)**

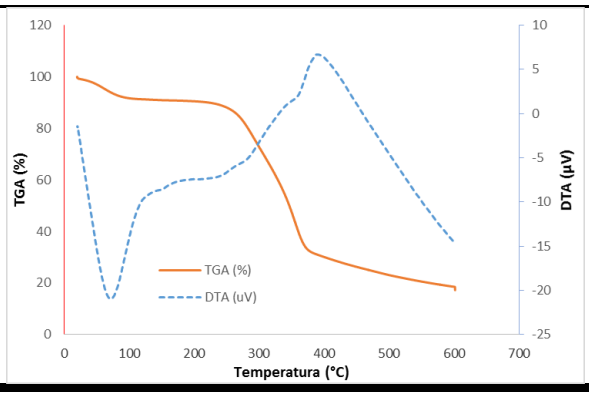
***E. camaldulensis***



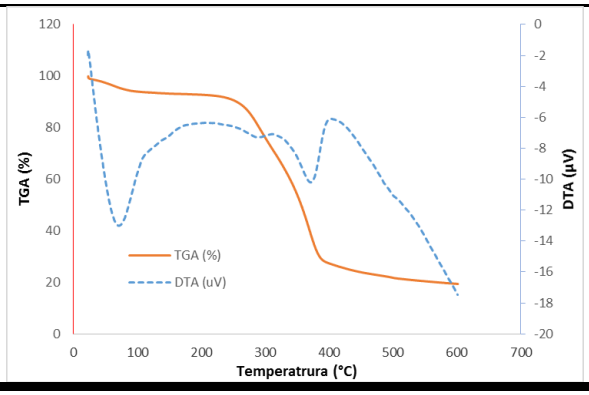



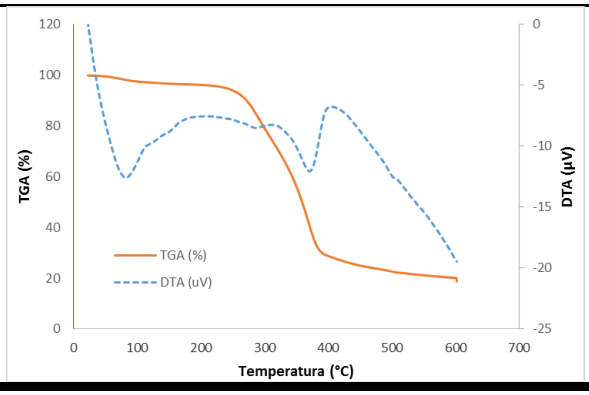

***E. citriodora***



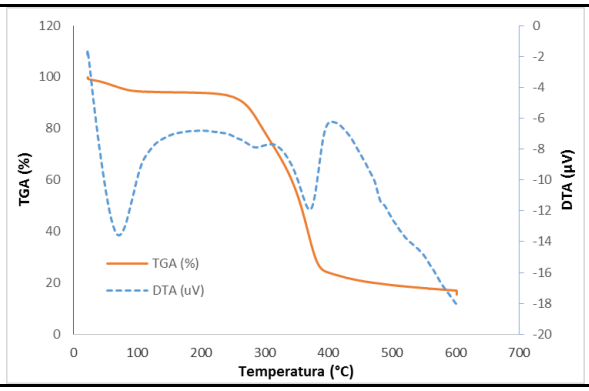




***E. grandis***




***E. pellita***



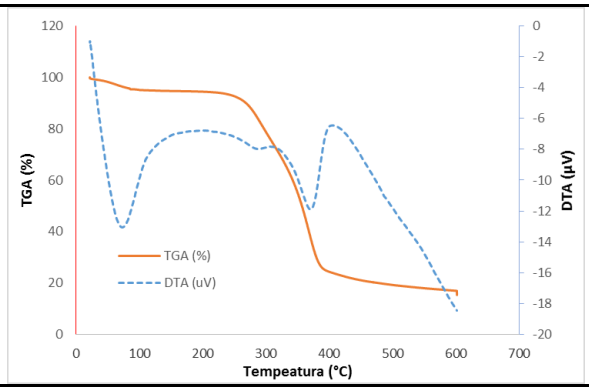
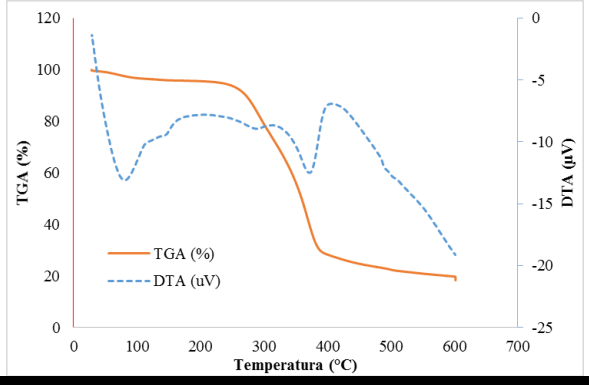
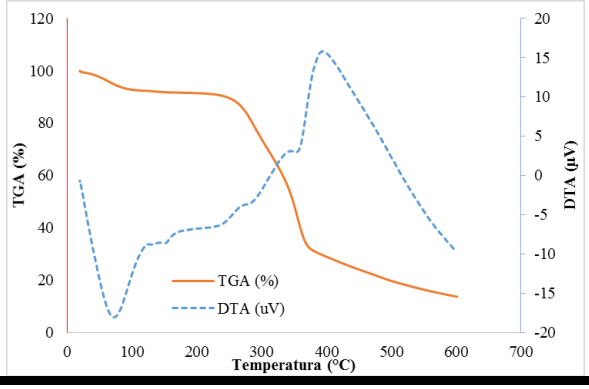



**Figura 20** – Curvas termogravimétricas da lenha.

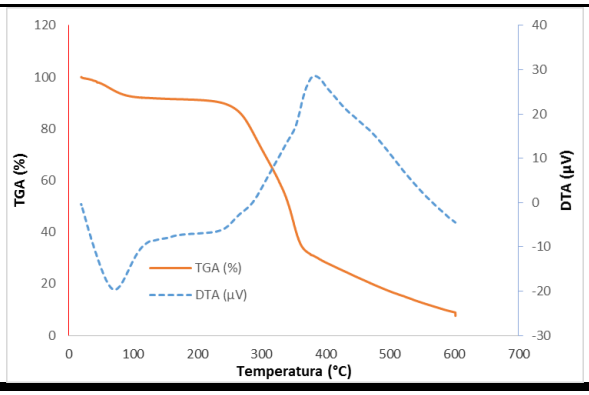
**(continuação)**

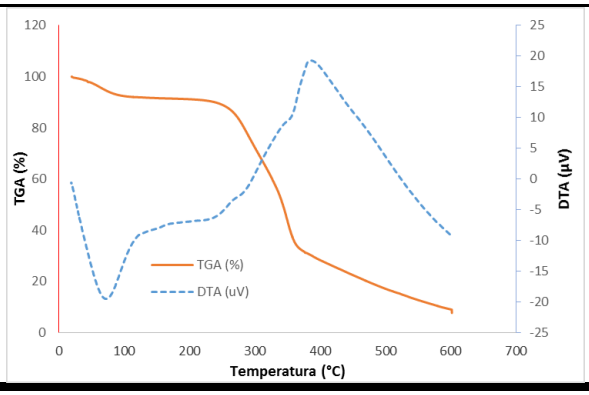
***E. propínqua***



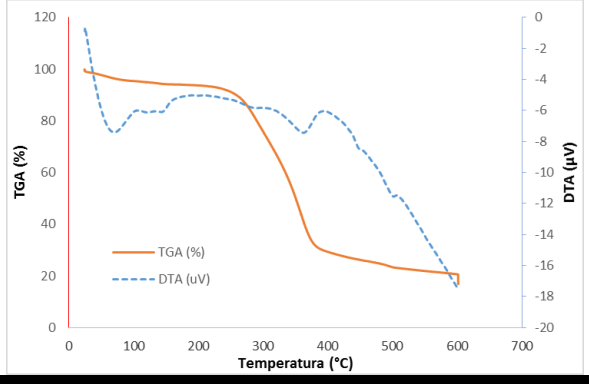



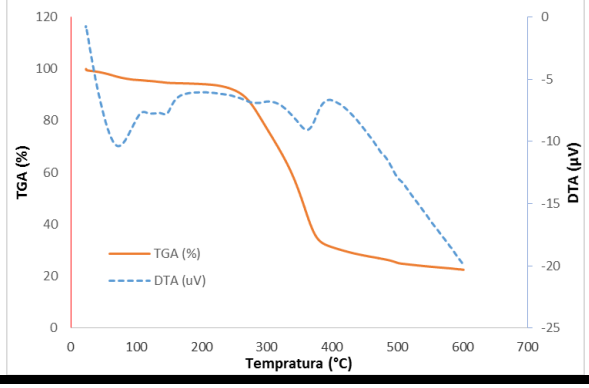

***E. saligna***



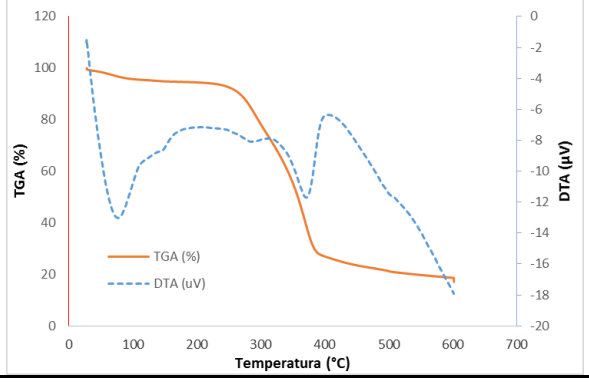




***E. tereticornis***




***E. urograndis***



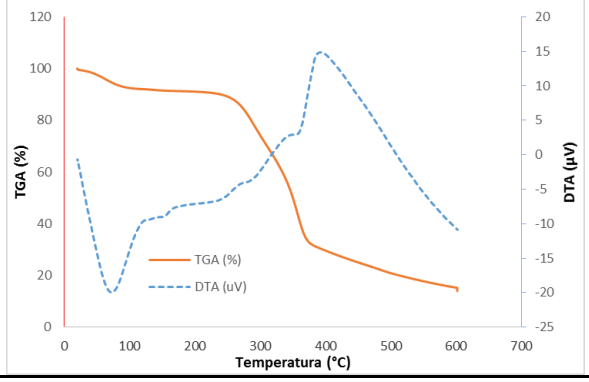
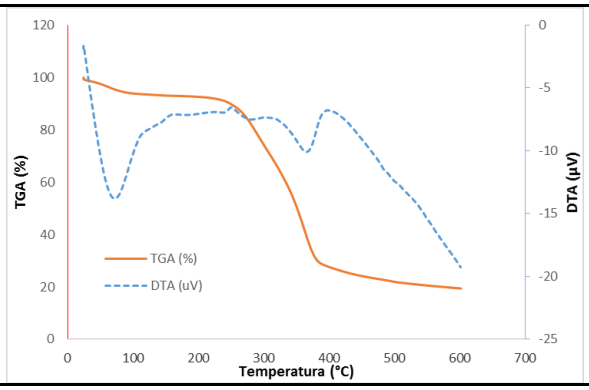
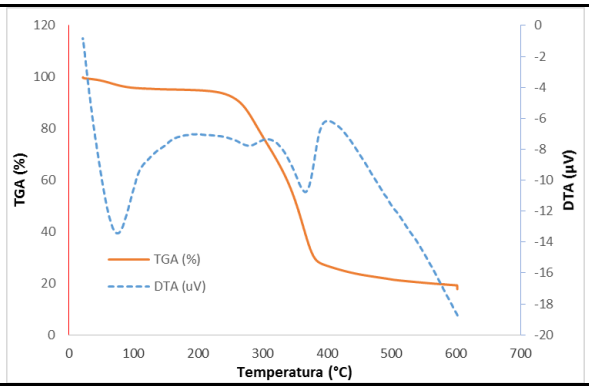



**Figura 20** – Curvas termogravimétricas da lenha.

**(conclusão)**

***E. urophylla***




Em todas as etapas de degradação térmica das lenhas de *Eucalyptus* spp. e *Corymbia citriodora*, observa-se a ocorrência de um pico endotérmico na curva de DTA. O pico de maior intensidade ocorre na perda de umidade da amostra, indicando que trata-se de um processo essencialmente endotérmico. No que se refere à degradação térmica das macromoléculas, há predominância de um pico endotérmico de menor intensidade, o que sugere a ocorrência de pirolise acompanhado de reações de oxidação. Estas reações de oxidação não são promovidas pelo meio inerte, mas sim pela presença de oxigênio elementar presente na composição das macromoléculas, principalmente dos polissacarídeos que são ricos em grupos hidroxilas. Devido à ocorrência de pico exotérmico na curva DTA, evidencia-se que as reações de oxidação se sobrepõem ao processo de pirólise da lenha nas amostras de *C. citriodora*, *E. propínqua*, *E. saligna* e *E. urograndis*.

## 5. CONCLUSÃO

O fogão à lenha aprimorado apresenta maior eficiência (13 %) e potência (0,38 kW) que o fogão tradicional (0,9% e 0,10 kW respectivamente) com menor consumo de lenha (0,66 kg/h versus 2,64 kg/h).

Há uma correlação positiva significativa entre consumo de combustível pelo fogão e a porosidade da lenha, sendo que as lenhas mais porosas favorecem a aeração nas cavidades celulares e assim facilita a reação de combustão.

A contribuição proporcional da lignina, extrativos e holocelulose na estimativa do PCS é de 48%; 28% e 25% respectivamente, partindo da fração mais energética para a menos energética.

Relativo à composição imediata, sendo a lignina a principal responsável pela formação do carbono fixo e a fração de holocelulose pela fração de voláteis, observa-se uma participação na estimativa do PCS dessas variáveis de 56% e 45% respectivamente.

O fogão aprimorado com chaminé alongada possui um potencial de exposição ao gás $CO_2$ 62% maior que a norma da Organização Mundial da Saúde (OMS), enquanto que o fogão tradicional é de 550%. Desta forma, ambos os fogões apresentam um nível de exposição maior que o estabelecido pela OMS, porém em menor nível no fogão aprimorado.

Conclui-se que o fogão aprimorado, com chaminé curta ou alongada, além de ser mais eficiente e potente, consumindo menos lenha no seu funcionamento, também promove uma menor liberação do gás tóxico monóxido de carbono.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira – Determinação do material solúvel em etanol: tolueno e em diclometano. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2003.

American Society for Testing and Material - ASTM Standard. **E711-8**. Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. West Conshohocken, PA, USA, 2004.

ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. 2.ed. Jundiaí: Campanhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 667p.

**Balanço Energético Nacional (BEN) 2017:** Ano base 2016. 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf. Acesso em 27 de mar de 2017.

BALDWIN, S. F. **Biomass Stoves: Engineering Desing, Development, and Dissemination**. Volunteers in Technical Assistance, 1987.

BHATTACHARYA, S. C.; ALBINA, D. O.; KHAING, A. M. Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 5, p. 387-395, 2002.

BRITO, J. O**.** O uso energético da madeira**. Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p.185–193, 2007.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Unicamp,. 735p., 2009.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2022.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>. Acesso em: 31 de mar de 2017.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Walter de Gruyter, 1984.

IBA: Industria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2016.** Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em 05 de jul de 2017.

IBEG. **População nos Censos Demográficos, segundo as Grandes Regiões, as Unidades da Federação e a situação do domicílio - 1960/2010.** Disponível em: http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8. Acesso em: 30 de mar. 2017.

JOSHI, V.; VENKATARAMAN, C.; AHUJA D.R.. Emissions fron Burning Biofuels in Metal Cookstoves. **Environmental Management** v. 13, n. 6, p. 763 – 772, 1989.

**Key World Energy Statistics (KWES) 2016:** Ano base 2015. 2016. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf. Acesso em 06 de jun de 2017

LAU, P. C.; MACHADO, G. O.; NOGUEIRA, L. A. H.; CHRISTOFORO, A. L.; GONÇALVES, D.; LAHR, F. A. R. Evaluation of the Efficiency Energy of Wood Stove from Irati Brazilian city. **International Journal of Agriculture and Forestry**, n. 3, v. 7: 267-272, 2013.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA, F. H. T., Statistical procedure to test identity between analytical methods. **Communication in soil science and plant analysis**, v.33, n.7-8, p.1105-1118, 2002.

MACHADO, G. O; CHRISTOFORO, A. L.; ARAUJO, V. A.; LAHR, F. A. R. Química da Madeira no Contexto Energético. São Carlos: **EESC/USP**, 121 p., 2016.

MARGULIS, S. **Causas do desmatamento na Amazônia brasileira**. Banco Mundial, 2004.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL.** Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em: 27 de jun. 2017.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. ANEEL p.200, 2000.

NORTHCROSS, A. L.; HAMMOND, S. K.; CANUZ, E.; SMITH, K. R. Dioxin inhalation doses from wood combustion in indoor cookfires. **Atmospheric Environment**, v. 49, p. 415-418, 2012.

PALMA, H. A. L.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora***. Cerne**, v. 16, p 141-148, 2010.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSALG. K. A. Correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. Fuel.** v. 84, p. 487-494, 2005.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y.. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, p. 113, 2000.

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.

PEREZ-PEÑA N.; VALENZUELA, L.; DIAZ-VAZ, E.; ANANIAS, R. A. Prediction of equilibrium moisture content in wood in relation to the specific gravity of the cell wall and environmental variables. **Maderas. Ciencia y tecnología** v. 13, n. 3, p. 253-266, 2011.

**PGQu - Verônica Calado - ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS**. Palestra da professora Verônica Maria de Araújo Calado para o programa de pós-graduação em química da UFRJ sobre o tema Análise Multivariada de Dados. Vídeos PGQu - Seminários e Vídeos do Programa de Pós-Graduação em Química da UFRJ, Publicado em 11 de dez de 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8nFTB0hgaRs>. Acesso em: 27 de set. de 2017.

RIBEIRO, B. L. C.; SILVA, D. P. Desenvolvimento sustentável e o uso das energias renováveis no Brasil. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 2014, Sergipe. **Anais...** São Cristóvão, ISBN: 978-85-7822-431-8.

RODRIGUES, L. A.; CARVALHO, D. A.; GOMES, L. J.; BOTREL, R. T. Espécies vegetais nativas usadas pela população local em Luminárias, MG. **Boletim Agropecuário**, v. 52, p. 1-34, 2002.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 5, p. 499-507, 2005.

SIAS, D. B. **Condutores e isolantes**. Coletânea de Objetos Educacionais – Projeto Cesta/CINTED/UFRGS, 2006. Disponível em <http://penta3.ufrgs.br/CESTA/fisica/calor/condutoreseisolantes.html > Acesso em 29 de nov. 2016.

SOARES, V.C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.38, n.3, p.543-549, 2014

SOTANNDE, O. A.; OLUYEGE. A. O.; ABAH G. B. Physical and combustion properties of charcoal briquettes from nem wood residues**. Int. Agrophysics** v.24, p 189-194, 2010.

STILL, D. E WINIARSKI, L. Increasing fuel efficiency and reducing harmful emissions in traditional cooking stoves, Aprovecho Research Center, Revista **Boiling Point**, v. 47, p. 36-39, 2001.

TELEGINSKI, E. Engenheiro Florestal, mestrando em Ciências Florestais, 2017.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex-maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALE, A. T.; RESENDE, R. Estimativa Do Consumo Residencial De Lenha Em Uma Pequena Comunidade Rural Do Município De São João D'aliança–Go. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 159-165, 2003.

VOLPATO, G.; BARRETO, R.E. Estatística sem dor. **Botucatu: Best Writing**, v. 1, p. 160, 2ª edição, 2016.

VOLUNTEERS IN TECHNICAL ASSISTANCE, INC. Testing the efficiency of wood burning cookstoves: international standards, **Arlington**, VA, 1985.

ZHANG, J.; SMITH, K. R.; UMA, R.; MA, Y.; KISHORE, V.V.N.; LATA. K.; KHALIL, M.A.K.; RASMUSSEN, R.A.; THORNELOE, S.T.. Carbon monoxide from cookstoves in developing countries: 2. Exposure Potentials. **Chemosphere: Global Change Science**, v. 1, n.1, p. 367 – 375, 1999.