



**EFEITOS DA ACÚSTICA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE  
TORREFAÇÃO E NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE  
*Eucalyptus grandis*.**

**LUIZ GUSTAVO OLIVEIRA GALVÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**EFEITOS DA ACÚSTICA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE  
TORREFAÇÃO E NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE**  
*Eucalyptus grandis.*

**LUIZ GUSTAVO OLIVEIRA GALVÃO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. AILTON TEIXEIRA DO VALE**

**COORIENTADOR: PROF. DR. EDER PEREIRA MIGUEL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM – 305/2018**

**BRASÍLIA/DF: FEV – 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

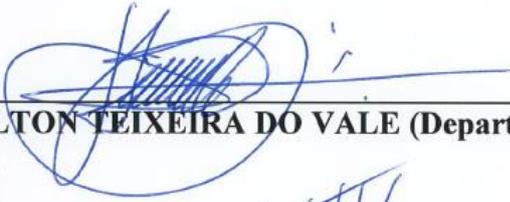
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

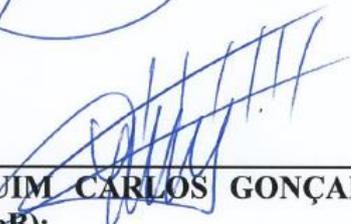
**EFEITOS DA ACÚSTICA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE  
TORREFAÇÃO E NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE  
*Eucalyptus grandis*.**

**LUIZ GUSTAVO OLIVEIRA GALVÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA  
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal  
– EFL/UnB);  
(Orientador)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. JOAQUIM CARLOS GONÇALEZ (Departamento de Engenharia  
Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES (Instituto Brasileiro de Informação  
em Ciência e Tecnologia - IBICT);  
(Examinador Externo)**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia  
Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Suplente)**

**Brasília, 02 de fevereiro de 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

GALVAO, LUIZ GUSTAVO OLIVEIRA

EFEITOS DA ACÚSTICA E DA TEMPERATURA NO PROCESSO DE TORREFAÇÃO E NAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*.

(EFL/FT/UNB, Mestre, Dissertação de Mestrado -Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Torrefação

2. Acústica

3. Conversão Energética

4. Processos Termoquímicos

I. EFL/FT/UNB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GALVAO, L.G.O. (2018). Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM – 305/2018 Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiz Gustavo Oliveira Galvão.

TÍTULO: Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*.

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Luiz Gustavo Oliveira Galvão

Quadra 106, lote 08 apt. 203, Águas Claras.

71.915-500 Brasília – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Essa jornada foi marcada por grandes superações no decorrer de todo mestrado. Pude vivenciar grandes experiências e aprendizados no curso de pós-graduação como o fortalecimento das amizades, a experiência formada nos laboratórios e nas disciplinas cursadas. Porém, muitas vezes o destino age de forma inesperada, nos dando um maravilhoso presente e logo em seguida nos retira, sendo necessário muito amor e compreensão para entender e superar tal situação. Dessa forma agradeço:

A Deus, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, me protegendo, me amparando e mostrando seu caminho.

Aos meus pais, Jurandi e Marli, por serem fonte da minha vida e exemplos de amor, carinho, sabedoria, paciência e modelo de união.

A minha linda e amada esposa Marina, por nosso amor incondicional, pelos nossos momentos felizes, por todo seu auxílio e paciência, por toda nossa superação nos momentos bem difíceis que tivemos que atravessar nesse período e por nunca me deixar desistir deste sonho.

Aos meus irmãos, Frederico e João, por nossa amizade, carinho, respeito e por saber que quando precisar, eles sempre estarão próximos e presentes.

A minha família, tanto dos meus pais, como da minha esposa, pelos incentivos, pelas ajudas, carinho e respeito.

Ao meu orientador Dr. Ailton Teixeira do Vale, pela compreensão, ensinamentos, conselhos, sugestões e disponibilidade durante toda a jornada acadêmica, sendo além de um ótimo professor, um verdadeiro amigo.

Aos amigos do peito e de jornada Edgar Amaral Silveira e Bruno Sant'Anna Chaves, pela amizade, pelos momentos vividos no laboratório, pelos estudos, ensinamentos, trabalho em equipe, superações e por sempre estarem a disposição para qualquer ajuda.

Ao professor Dr. Marcus Vinícius Girão de Moraes, pelos ensinamentos e paciência na difícil temática da acústica e ao pesquisador Patrick Rousset e Dr. Thiago Rodrigues pelos ensinamentos na área da torrefação e ao Dr. Eder P. Miguel pela ajuda nas análises estatísticas.

Aos amigos, Marcelo, Greg, Sérgio, Mariana, Thaís e Myla pelo trabalho, carinho, paciência e amizade.

A todos os colegas do Laboratório de Produtos Florestais, que fazem desta instituição uma verdadeira família unida.

Ao meu cachorro Iron, companheiro e amigo de todos os momentos.

Aos meus amigos de todas as épocas, por sempre me incentivarem e pelas várias experiências vivenciadas comigo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

**Efeitos da acústica e da temperatura no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira de *Eucalyptus grandis*.**

**Autor: Luiz Gustavo Oliveira Galvão**

**Orientador: Ailton Teixeira do Vale**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, fevereiro de 2018.**

A biomassa é a forma mais comum de energia renovável, necessitando de processos de conversão energética para substituir fontes convencionais de energia, como os combustíveis fósseis. Uma das alternativas de conversão é a torrefação, uma forma moderada de pirólise realizada sob temperaturas que variam de 200 a 300°C, que visa a melhoria das propriedades energéticas da madeira. Várias tecnologias de torrefação foram desenvolvidas e implementadas nos últimos anos, porém não há relatos do uso da acústica em reatores de torrefação. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da temperatura combinada com uso da acústica, no processo de torrefação e nas seguintes propriedades energéticas: análise química imediata, análise elementar, poder calorífico superior, densidade energética e rendimento energético. Além de outras propriedades relacionadas ao uso energético como rendimento gravimétrico, perda de densidade e módulo de ruptura. Para a execução do experimento foi utilizado reator de torrefação laboratorial capaz de trabalhar com diferentes rampas e patamares de aquecimento, controlar o teor de oxigênio dentro da câmara, medir as perdas de massa e as temperaturas da amostra em tempo real, reproduzir gráficos e emitir ondas sonoras com diferentes frequências e amplitudes por meio de um gerador de sinais e um alto-falante. A madeira utilizada foi da espécie *Eucalyptus grandis* nas dimensões 3 x 3 x 3cm. Os fatores estudados na torrefação foram temperatura (250 e 270°C) e acústica (testemunha e frequências 1411, 1810, 2478 e 2696 Hz) com 5 repetições para cada tratamento, tendo como parâmetros constantes a taxa de aquecimento a 5°C min<sup>-1</sup>, patamar de 60 minutos, controle de oxigênio limitado a 10% do ambiente e amplitude das ondas sonoras a 10volts. Os resultados indicam que o campo acústico promoveu a antecipação das reações de degradação da biomassa, apresentando maiores picos de temperaturas máximas (fase exotérmica) e menores tempos para atingir o patamar desejado, devido ao aumento da velocidade das partículas em torno da amostra da madeira e consequente aumento da transferência de calor por convecção, sugerindo um menor tempo de residência. A análise das propriedades energéticas indicou que a temperatura quando observada isoladamente, foi suficiente para alterar significativamente todas as propriedades analisadas, em contrapartida, a adição da acústica e a interação com a temperatura não foi capaz de proporcionar significativamente alterações nas principais propriedades energéticas na torrefação. As frequências 1411 Hz e 2696 Hz se mostraram promissoras para realização de novos estudos de tratamentos térmicos sob efeito acústico por apresentarem valores absolutos superiores ao da testemunha.

**Palavras chaves:** madeira, torrefação, temperatura, acústica, propriedades energéticas.

## ABSTRACT

**Effects of acoustics and temperature on torrefaction process and on wood energy properties (*Eucalyptus grandis*).**

**Author: Luiz Gustavo Oliveira Galvão**

**Advisor: Ailton Teixeira do Vale**

**Forest Science Post-Graduation Program.**

**Brasilia, February de 2018.**

Biomass is the most common form of renewable energy, requiring energy conversion processes to replace conventional sources of energy, such as fossil fuels. One of the conversion alternatives is torrefaction, that is a mild form of pyrolysis carried out under temperature ranging from 200 to 300 °C, which aims to improve the energy properties of the wood. Several torrefaction process technologies have been developed and implemented in recent years, but there are no reports of the use of acoustics in torrefaction reactors. The aim of the present work was to evaluate the effects of temperature combined with the use of acoustics in the torrefaction process and in the following energy properties: proximate analysis, ultimate analysis, higher heating value, energy density and energy yield, and other properties that are related with energy use: solid yield, loss of density and modulus of rupture. For the execution of the experiment we used a laboratory scale torrefaction reactor capable of working with different ramps and heating levels, oxygen level controlling in the chamber, mass loss measurement, real time monitoring of sample temperatures, graphs plotting and acoustic waves emission with different frequencies and amplitudes by means of a signal generator and a loudspeaker. The wood used was of the species *Eucalyptus grandis* worked to cubic samples with 3 x 3 x 3cm. The factors studied in the torrefaction were temperature (250 and 270°C) and acoustic (control and frequencies 1411, 1810, 2478 and 2696 Hz) with 5 repetitions for each treatment, having as constant parameters the heating rate at 5°Cmin<sup>-1</sup> with 60-minute plateau, oxygen level set at 10% and amplitude of acoustic waves at 10 volts. The results indicate that the acoustic field promoted an anticipation of the degradation reactions of the biomass, presented higher peaks of maximum temperatures (exothermic phase) and shorter times to reach the plateau temperature, possibly by increasing the velocity of the particles around the wood sample or by increasing convection heat transfer, suggesting a shorter residence time. Analysis of the energy properties indicates that temperature alone was enough to impact all properties significantly. In contrast, the addition of acoustics and its interaction with temperature was not sufficient to significantly impact the main energy properties in the torrefaction. The frequencies 1411 Hz and 2696 Hz were promising for new studies of heat treatments under acoustic effect because they had higher absolute values of energy properties than the control samples.

**Key words:** wood, torrefaction, temperature, acoustic, energy properties.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS .....	3
2.2 BIOMASSA .....	4
2.2.1 Conceito .....	4
2.2.2 Estrutura e composição molecular da biomassa .....	4
2.3 MADEIRA .....	7
2.3.1 Propriedades energéticas da Madeira .....	8
2.3.2 Madeira uso energético.....	10
2.3.3 Eucalipto .....	10
2.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA .....	11
2.5 PROCESSOS TERMOQUÍMICOS .....	12
2.6 TORREFAÇÃO .....	13
2.6.1 Histórico.....	13
2.6.2 Conceito e objetivo.....	13
2.6.3 Características e parâmetros da torrefação .....	14
2.6.4 Tecnologias de torrefação.....	18
2.7 ACÚSTICA.....	21
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 ESPÉCIE, ORIGEM E PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....	23
3.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO .....	24
3.2.1. Reator de Torrefação .....	25
3.2.2. Detalhamento dos parâmetros do experimento .....	26
3.2.3. Manuseio dos corpos de prova .....	28
3.2.4. Posicionamento das amostras no reator.....	28
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS .....	30
3.3.1 Densidade aparente seca (0% de umidade).....	30
3.3.2 Compressão Paralela às Fibras.....	31
3.3.3 Análise Química Imediata.....	32
3.3.4 Análise Elementar .....	33
3.3.5 Poder Calorífico Superior.....	34
3.3.6 Densidade Energética .....	36
3.3.7 Rendimento Gravimétrico .....	37
3.3.8 Rendimento Energético .....	37
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	37
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
4.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	39
4.2 PROCESSO DE TORREFAÇÃO .....	40
4.2.1 Evolução da Temperatura .....	40
4.2.2 Evolução da Perda de massa .....	44
4.3 PROPRIEDADES DO PRODUTO TORRIFICADO .....	48
4.3.1 Rendimento gravimétrico, densidade aparente e perda de massa.....	48

<i>4.3.2 Compressão paralela às fibras</i> .....	51
<i>4.3.3 Análise Imediata</i> .....	55
<i>4.3.4 Análise elementar</i> .....	59
<i>4.3.5 Poder Calorífico Superior, Densidade Energética e Rendimento Energético</i> ....	63
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>69</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Resumo das propriedades da celulose e hemicelulose, lignina na biomassa .....	7
Tabela 2.2 Classificação e efeitos da temperatura nos componentes e nos produtos formados no processo de torrefação. ....	16
Tabela 2.3 Principais vantagens e limitações de diferentes tipos de reatores industriais utilizados para torrefação de biomassa energética (ACHARYA et al., 2012 - adaptado). 19	
Tabela 2.4 Modelos de reatores para torrefação em escala de bancada. ....	20
Tabela 3.1 Dinâmica das variáveis nos ensaios de torrefação. ....	27
Tabela 4.1 Valores médios das propriedades físicas e químicas da biomassa in natura ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	39
Tabela 4.2 Resumo da análise de variância para o rendimento gravimétrico e perda de densidade aparente pós torrefação. ....	49
Tabela 4.3 Valores médios dos rendimentos gravimétricos e perda de densidade aparente da madeira de eucalipto submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas. ....	49
Tabela 4.4 Comparação dos valores médios da porcentagem da perda de massa no processo de torrefação da madeira <i>Eucalyptus grandis</i> do presente trabalho (testemunha) e da literatura. ....	50
Tabela 4.5 Resumo da análise de variância para o carga máxima média e módulo de ruptura (MOR) pós torrefação. ....	52
Tabela 4.6. Valores médios da carga máxima média e Módulo de ruptura (MOR) da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas. ....	53
Tabela 4.7 Resumo da análise de variância para a análise química imediata pós torrefação. ....	56
Tabela 4.8 Valores médios da composição química imediata da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas. ....	56
Tabela 4.9 Comparação de valores da porcentagem de Carbono fixo do presente trabalho com estudos de torrefação realizados com a madeira de Eucalipto na literatura. ....	59
Tabela 4.10 Valores da composição química elementar da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas. ....	60
Tabela 4.11 Valores do Poder calorífico superior, densidade Energética e rendimento energético da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas. ....	63
Tabela 4.12 Médias das densidades aparentes das madeiras antes e após a torrefação. ....	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Parede celular e componentes da biomassa . . . . .	5
Figura 2.2 Variação das propriedades da biomassa submetida à torrefação . . . . .	14
Figura 2.3 Balanço de massa/energia do processo de torrefação. . . . .	18
Figura 3.1 Preparo dos corpos de prova. A) abate da espécie <i>Eucalyptus grandis</i> na FAL. B) retirada das costaneiras e formação de bloco. C) desdobro da madeira na carpintaria do LPF. D) Amostras confeccionadas em formato cúbico 3 x 3 x 3cm. . . . .	24
Figura 3.2 - Reator de torrefação instalado na área de energia do LPF . . . . .	25
Figura 3.3 - Diagrama geral do sistema experimental de torrefação 1) Gerador de ondas acústica; 2) alto-falante sonoro 3) cilindro N2; 4) bomba de gás; 5) controle de O2; 6) Câmara do reator; 7) suporte de amostra; 8) Resistências elétricas para aquecimento por convecção; 9) Termopares; 10) Controle do sistema; 11) Computador; 12) balança analítica. . . . .	26
Figura 3.4 Determinação da densidade aparente da amostra. A) Verificação da massa do corpo de prova. B) Medição do volume com paquímetro digital. . . . .	28
Figura 3.5 Posição das amostras no suporte do reator. . . . .	29
Figura 3.6 Posicionamento dos dois corpos de prova no interior do reator . . . . .	30
Figura 3.7 Máquina universal de ensaios – EMIC DL30000. . . . .	31
Figura 3.8 Analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 series II, localizado no Instituto de Química da UnB. . . . .	34
Figura 3.9 Calorímetro – PARR 6400 . . . . .	35
Figura 3.10. Fabricação de pellet para ensaio de determinação de poder calorífico. . . . .	36
Figura 4.1 Temperaturas médias das repetições de cada tratamento no patamar de 250° C. A) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado no centro da amostras; B) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado na superfície da amostras. . . . .	41
Figura 4.2 Temperaturas médias das repetições de cada tratamento no patamar de 270° C. A) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado no centro da amostras; B) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado na superfície da amostras. . . . .	43
Figura 4.3 Perda de massa média das repetições de cada tratamento no patamar de 250°C. A) Médias das massas em relação ao tempo auferidas por balança de precisão a cada 30 segundos; B) Derivada da massa em relação ao tempo. . . . .	45
Figura 4.4 Perda de massa média das repetições de cada tratamento no patamar de 270°C. A) Médias das massas em relação ao tempo auferidas por balança de precisão a cada 30 segundos; B) Derivada da massa em relação ao tempo. . . . .	47
Figura 4.5 Comparativo do estudo de perda de massa em diferentes temperaturas no processo de torrefação para a madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> . . . . .	51

Figura 4.6 Porcentagem de perda de MOR em relação à biomassa in natura. ....	54
Figura 4.7 Porcentagem de Materiais Voláteis e Carbono Fixo presente na madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> após torrefação sob dois fatores: temperatura e Frequência acústica. .	58
Figura 4.8 Percentuais de perdas e ganhos em Oxigênio e Carbono das amostras torrificadas em relação à biomassa in natura de <i>Eucalyptus grandis</i> . ....	62
Figura 4.9 Média dos ganhos percentuais em Poder Calorífico Superior e Carbono Fixo das amostras torrificadas em relação à biomassa in natura de <i>Eucalyptus grandis</i> .....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI = American National Standards Institute

ASTM = American Society for Testing and Materials

C = Carbono

CF = Carbono fixo

cm<sup>3</sup> = Centímetro cúbico

CO = Monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> = Dióxido de carbono

COPANT = Comisión Panamericana de Normas Técnicas

CV = Coeficiente de variação

Cz = Cinzas

DA = Densidade aparente

DE = Densidade energética

FV = Fator de variância

g = gramas

GJ = Gigajoules

GL = Graus de liberdade

H = Hidrogênio

Hz = Hertz

J = joules

Kcal = Quilocalorias

Kgf = quilograma força

LPF = Laboratório de Produtos Florestais

m = grau de polimerização

M<sup>3</sup> = metro cúbico

MJ = Megajoules

MOR = Módulo de ruptura

MV = Material volátil

N = Nitrogênio

$\eta_e$  = Rendimento Energético

ns = não significativo

O = Oxigênio

PCS = Poder calorífico superior

RG = Rendimento Gravimétrico

TDT = temperatura de degradação térmica

U = Umidade

\* = significativo a 5 % pelo teste F

\*\* = significativo a 1% pelo teste F

# 1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis foram responsáveis pelos grandes avanços tecnológicos nos últimos séculos, sendo que nos dias atuais estima-se que 85% da energia no mundo são obtidos por meio dessa fonte (SINGH et al., 2016). Apesar dos ganhos tecnológicos, essas mesmas fontes são causadoras diretas de grandes impactos ambientais, por meio da emissão de gases de efeito estufa, geradores do aquecimento global e das mudanças climáticas no mundo (VICHI; MANSOR, 2009).

Dessa forma, cada vez mais, os países buscam a adoção do uso de energias renováveis em sua matriz energética, de modo a minimizar os efeitos ambientais e diminuir a dependência por petróleo (CORTEZ et al., 2008).

O Brasil, no contexto mundial, tem papel de destaque, pois possui 43,5% de participação de combustíveis renováveis na sua oferta interna de energia. Desses 43,5%, a biomassa contribui com 25,5%, sendo que 8,0% são de origem florestal, ou seja, provenientes de lenha e carvão (MME, 2017).

A biomassa constitui uma importante fonte primária de energia renovável e pode sofrer processos de conversão, sejam eles físicos, biológicos ou termoquímicos, para homogeneizar características e adequar ao uso final mais apropriado. Dentre as diversas biomassas utilizadas para geração de energia, a biomassa florestal se destaca pela queima da madeira e aproveitamento de resíduos da exploração, produção de carvão, alcatrão e ácido pirolenhoso (COUTO et al., 2000). Porém, a biomassa florestal, apresenta algumas propriedades que limitam seu uso direto de forma eficiente, quando comparada com combustíveis líquidos, tais como: alto teor de umidade, baixo teor de carbono fixo, relacionado com um alto teor de voláteis, baixo poder calorífico, e variações nas dimensões e nas densidades.

Sendo assim, faz-se necessário o emprego de tratamentos prévios e a utilização de equipamentos apropriados para conversão energética final. A busca por tecnologias e métodos de conversão que tornem a biomassa um competitivo combustível sólido, líquido ou gasoso, é essencial para poder introduzi-la nos mercados energéticos (FELFLI et al., 2000).

Uma das alternativas de conversão energética da biomassa é a torrefação, que ocorre em temperaturas que variam de 200 a 300°C, e tem por objetivo produzir um combustível sólido, mais homogêneo, com maior concentração de energia, hidrofóbico e com menor teor de oxigênio (CHEN et al, 2015). Como todo tratamento térmico, na torrefação há um consumo de energia no processo, que em muitos casos aumenta os custos, inviabilizando o uso em plantas comerciais. Assim, alternativas que melhorem a eficiência e o controle do sistema são desejáveis.

O acoplamento de novas tecnologias ao reator de torrefação, como a utilização de acústica (ondas sonoras) combinada com a temperatura, podem vir a contribuir para aumento da eficiência e melhoramento das características energéticas do material torreficado. O emprego da acústica em combustão por escoamento pulsado já proporcionou vantagens, como a economia de combustível, maior produtividade, aumento das taxas de transferência de calor pelo processo de convecção, redução na emissão de poluentes e investimento de capital (ZINN, 1996). No entanto, até o presente momento, não foram realizados estudos do processo de torrefação sob pirólise, combinada com um campo acústico e seus efeitos sobre a biomassa torreficada.

Este trabalho é fruto de uma parceria dos Departamento de Engenharia Florestal, e Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB) e do Laboratório de Produtos Florestais (LPF).

O objetivo foi avaliar os efeitos da acústica, com emprego de duas temperaturas e quatro diferentes frequências, no processo de torrefação e nas propriedades energéticas da madeira torreficada.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS**

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível no planeta. São praticamente inesgotáveis e perfazem um conjunto de fontes de energia não convencionais que se regeneram de uma forma cíclica e em uma escala de tempo reduzida, diferindo assim dos combustíveis fósseis (PACHECO, 2006).

As fontes renováveis podem ser transformadas em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, utilizados para gerar energia calorífica, elétrica e mecânica. No contexto atual, torna-se imprescindível a inserção das fontes renováveis nas políticas energéticas dos países, já que exercem um papel fundamental para a sustentabilidade (COSTA & PRATES, 2005), tanto no contexto socioeconômico, quanto na diversificação de geração de energia (GUEDES et al, 2010).

Com o desenvolvimento tecnológico, elas estão sendo utilizadas como combustíveis alternativos (álcool e biodiesel) para o setor de transporte (PACHECO, 2006). Portanto além de serem classificadas como opções ambientalmente corretas, podem ser alternativas viáveis às fontes tradicionais (COSTA & PRATES, 2005).

As indústrias que utilizam fontes alternativas costumam se localizar próximas aos centros de consumo, de forma a diminuir os custos e com isto aumentar a competitividade com fontes tradicionais (COSTA & PRATES, 2005).

Atualmente no Brasil, as principais fontes renováveis de energia são a hidráulica e biomassa, seguidas das energias eólica e solar, insipiente no balanço energético nacional (MME, 2017). Estas energias, juntamente com a energia hidráulica, são utilizadas exclusivamente para obtenção de energia elétrica, enquanto que a biomassa, além do uso para obtenção de energia elétrica, se destaca na geração de biocombustíveis e produtos químicos (PACHECO, 2006).

Apesar da enorme popularidade adquirida pela biomassa energética nos últimos anos, a fração de sua utilização na produção de energia permanece insignificante no total de fonte para produção de energia nas nações industrializadas (ACHARYA et al., 2012).

## **2.2 BIOMASSA**

### **2.2.1 Conceito**

De forma detalhada, Coelho (1982) define biomassa como o conjunto de materiais orgânicos gerados por organismos autótrofos do reino vegetal (fitomassa) ou acumulados nos seres heterótrofos do reino animal (zoomassa). Os organismos fotossintéticos (autótrofos) são capazes de transformar a energia solar em energia química, mediante a atuação biogeoquímica dos cloroplastos contidos na clorofila das plantas. Essa energia é retida e acumulada nos espaços intermoleculares e é liberada em processos que envolvem oxidação, redução e hidrólise, que podem ser de natureza termoquímica, bioquímica e biológica.

Em geral, a biomassa é um material orgânico ou biológico, que pode servir como fonte de energia renovável através de processos de conversão térmica ou bioquímica. Ela também pode ser classificada como material à base de carbono, composto por mistura de moléculas orgânicas incluindo ainda os elementos de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (ACHARYA et al, 2012).

Chen et al, (2015) destaca que as plantas crescem absorvendo dióxido de carbono da atmosfera, bem como água e nutrientes dos solos, seguindo-se a conversão em hidrocarbonetos através da fotossíntese.

As biomassas são provenientes de resíduos urbanos e industriais, da madeira, de culturas agrícolas, de plantas aquáticas, algas, animais, processamento de alimentos e resíduos, além da obtenção de biofluidos por meio de óleos (CORTEZ et al, 2008; GUEDES et al, 2010).

Quando a biomassa é utilizada para uso energético ocorre a fotossíntese inversa, ou seja, a energia solar armazenada pelo vegetal, é liberada pelo processo de combustão onde há o consumo de oxigênio atmosférico e a restituição do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para o ar atmosférico (NOGUEIRA et al., 2000). Assim, o uso da biomassa como fonte de energia pode ser considerado neutro na emissão de gases do “efeito estufa”, uma vez que o CO<sub>2</sub> liberado é aproximadamente equivalente à quantidade absorvida durante o processo de fotossíntese (CHEW & DOSHI, 2011).

### **2.2.2 Estrutura e composição molecular da biomassa**

A biomassa é constituída pela celulose (polímero glucosan), hemiceluloses, também chamados de poliose, lignina - polímero fenólico complexo – (figura 2.1), extrativos orgânicos e minerais inorgânicos, também chamados de cinzas (CHEN et al, 2015).

Os três primeiros constituintes são os principais componentes da biomassa e seus percentuais de peso dependem de cada espécie. Por exemplo, os constituintes em geral nas coníferas compreendem em 42% de celulose, 27% de hemicelulose, 28% de lignina e 3% de extrativos orgânicos; nas folhosas compreendem em 45% de celulose, 30% de hemicelulose, 20% de lignina e 5% de extrativos orgânicos (PENG et al, 2012). Já os minerais inorgânicos geralmente representam menos de 1% do conteúdo em madeira (CHEN et al, 2015).

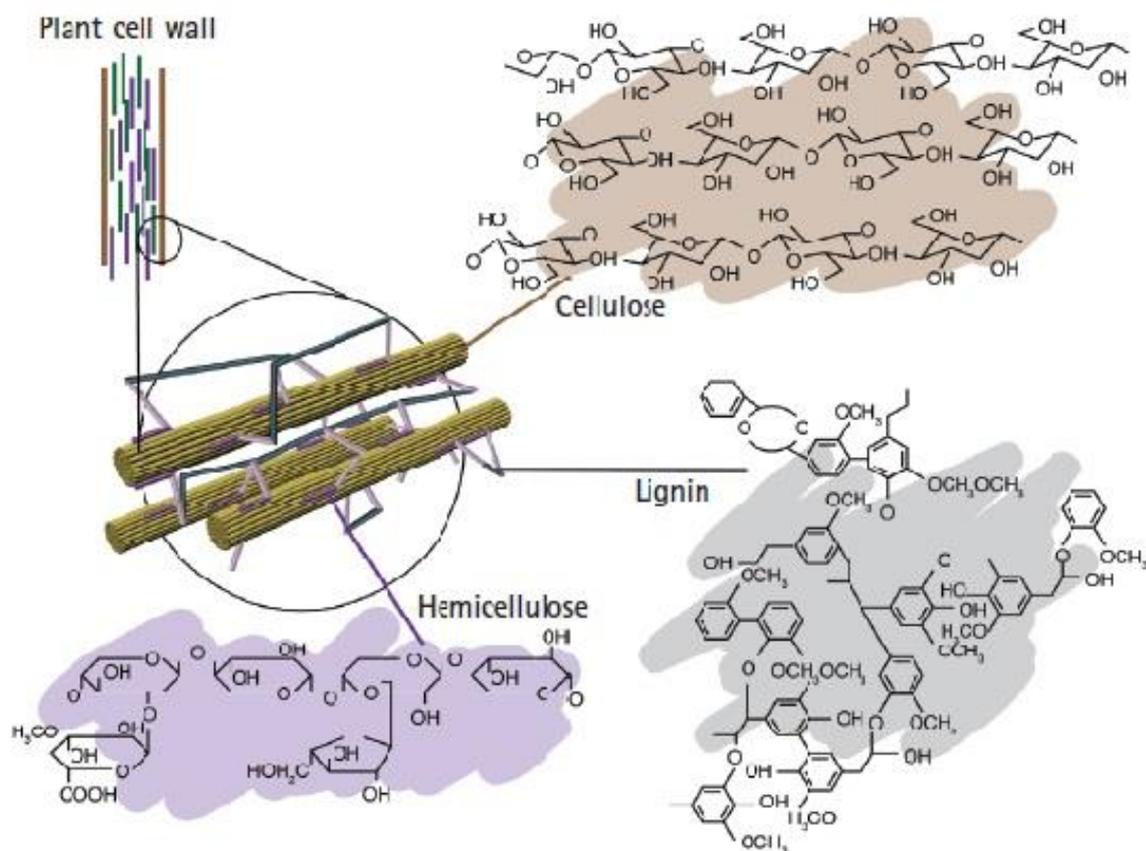


Figura 2.1 Parede celular e componentes da biomassa (TUMULURU et al, 2011).

## Celulose

A celulose é a substância orgânica mais abundante da madeira (PENG et al., 2012), compondo 45% do seu peso seco (ACHARYA et al, 2012). É um polímero linear composta por subunidades de D-glicose ligadas entre si para formar longas cadeias, constituído normalmente por 8.000-10.000 moléculas de glicose e uma faixa de peso molecular de 300.000-500.000 (PENG et al., 2012). Possui estruturas cristalinas e amorfas, sendo sua fórmula geral expressa por  $(C_6H_{10}O_5)_m$ , onde m subscrito é o grau de polimerização (CHEN et al, 2015). Com sua

estrutura fibrosa e forte ligação de hidrogênio, a celulose é importante para resistência mecânica madeira, sendo insolúvel na maioria dos solventes (PENG et al., 2012). A degradação da celulose começa em temperaturas altas devido à alta resistência da sua estrutura cristalina (TUMULURU et al., 2011).

### **Hemicelulose**

A hemicelulose é um polímero de carboidratos complexos com um peso molecular mais baixo do que a celulose e representa 25 a 30% do peso seco total da madeira (ACHARYA et al., 2012). Sua estrutura básica pode ser representada por  $(C_5H_8O_4)_m$  e consiste numa mistura ramificada de vários monossacarídeos polimerizados, tais como xilose, glicose, manose, galactose, arabinose e ácido glucurônico (CHEN et al., 2015). Compreende-se por cadeias de polímeros mais curtas com 500-3.000 unidades de açúcar (TUMULURU et al., 2011). Em contraste com a celulose, as hemiceluloses são polímeros facilmente hidrolisáveis e não formam agregados (PENG et al., 2012). A degradação térmica da hemicelulose ocorre em temperaturas mais baixas, com a maior parte da perda percebida acima dos 180°C (ARIAS et al., 2008). A hemicelulose produz menos alcatrão e carvão devido à sua baixa faixa de temperatura de degradação comparada à da celulose (TUMULURU et al., 2011).

### **Lignina**

Lignina é um composto tridimensional, altamente ramificado e polifenólico que consiste em uma matriz irregular substituídas por "hidroxi" e "metoxi" em unidades de fenilpropano. Sua fórmula química é representada por  $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-1,7}]_m$  (CHEN & KUO, 2011). As propriedades físicas e químicas da lignina variam significativamente entre as espécies, sendo o principal aglutinante para a aglomeração de componentes celulósicos fibrosos. Possui estrutura amorfa e ligações covalentes entre unidades individuais, causando reações aleatórias não seletivas. A lignina geralmente não pode ser dividida em unidades monoméricas simples sendo insolúvel na maioria dos solventes (PENG et al., 2012), de difícil desidratação e mais complexo para converter-se em carvão do que a celulose ou hemicelulose (TUMULURU et al., 2011).

### **Extrativos**

Os extrativos são compostos não-estruturais, incluindo proteínas, óleos, amidos e açúcares. Eles conferem as plantas odor, cor e durabilidade, podendo ser extraídos por água quente ou outros solventes (TUMULURU et al., 2011).

## Cinzas

Cinzas são resíduos sólidos inorgânico que permaneçam após um combustível sofrer combustão completa. Muitas vezes contém carbonatos, fosfatos e sulfatos de sílica, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Componentes de cinzas variam entre fontes e tipos de biomassa. Alguns elementos minerais podem ser provenientes de sujeiras e outras impurezas durante o processo de coleta e não inerentes à biomassa (BATES & GHONIEM, 2012). A compreensão da natureza e do comportamento destes constituintes são importantes para elucidar características de torrefacção (CHEN et al, 2015). As propriedades da celulose, hemicelulose e lignina estão resumidas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Resumo das propriedades da celulose e hemicelulose, lignina na biomassa (CHEN et al, 2015 - adaptado)

	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lignina</b>
Estrutura	Linear	Ramificada	Tridimensionais
Fórmula	$(C_6H_{10}O_5)_m$	$(C_5H_8O_4)_m$	$[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-7}]_m$
Razão atômica O/C	0,83	0,80	0,47 – 0,36
Razão atômica H/C	1,67	1,60	1,19 – 1,53
TDT <sup>b</sup> (°C)	315 – 400	220 – 315	160 - 900
Componente	Glicose	Xilose, glicose, manose, galactose, arabinose e ácido glucurônico	Fenilpropopano
Comportamento térmico	Endotérmico (exotérmico se a formação de carvão for significativa)	Exotérmica	Exotérmica

<sup>a</sup> m: grau de polimerização.

<sup>b</sup> TDT: temperatura de decomposição térmica.

## 2.3 MADEIRA

A madeira pode ser definida como um biopolímero tridimensional (ROWELL et al., 2005), constituída de celulose (um polissacarídeo formado por monômeros de glicose), hemicelulose (polímeros ramificados e cadeias mais curtas do que a celulose), lignina (polímero fenólico complexo), extrativos orgânicos e inorgânicos minerais (também chamado de cinzas).

A madeira se caracteriza ainda por ser um material bastante heterogêneo com variação das características entre espécies, na própria espécie e dentro do próprio indivíduo. O conhecimento das características químicas, físicas e anatômicas é importante para o uso energético da madeira (RODRIGUES, 2009).

### **2.3.1 Propriedades energéticas da madeira**

As propriedades energéticas da madeira podem ser avaliadas por meio do teor de umidade; da análise imediata que determina a porcentagem de carbono fixo, teor de voláteis e teor de cinzas; a análise elementar que determina quantidade de carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio; densidade aparente; densidade energética; e o poder calorífico (RODRIGUES, 2009).

O teor de umidade é uma importante característica, pois no processo de combustão a água presente na madeira deve ser evaporada e para isto necessita de calor fornecido pela própria madeira. A madeira recém cortada, apresenta teor de umidade máximo em base seca, que pode ultrapassar 100%. Madeira cortada e seca ao ar por 6 meses ou 1 ano abrigada das intempéries apresenta teor de umidade variando entre 15 e 25% (BRITO & BARRICHELO, 1979). Para combustão o teor de umidade deve estar em torno de 25% de umidade, segundo Farinhaque (1981).

A análise imediata é composta pelo teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Os materiais voláteis são os gases que se desprendem do combustível durante a queima da madeira, enquanto que a cinza é o material inorgânico restante da combustão completa. O teor de carbono fixo está associado a uma queima mais lenta e maior poder calorífico. Geralmente o conteúdo de materiais voláteis na madeira é alto, variando de 70 a 88% em peso, enquanto que o conteúdo de carbono fixo é baixo, variando de 10 a 21% (CHEN et al, 2015).

Os principais elementos da madeira incluem carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S). O carbono é a principal fonte de calor liberada na combustão. Materiais que têm maiores teores de carbono e hidrogênio, possuem maior capacidade térmica, em função da maior energia liberada por esses na reação de combustão (VALE et al., 2010). No entanto, maior teor de hidrogênio contido em um combustível geralmente é acompanhado por um menor teor de carbono. O oxigênio contido na biomassa é propício à queima de combustível, mas reduz o valor calorífico da biomassa (CHEN et al, 2015). A baixa quantidade de enxofre difere a madeira dos carvões minerais e óleos pesados, pois quando queimada, não causa poluição do ar com compostos sulfurosos (BRITO & BARRICHELO, 1979). A madeira possui uma composição química elementar constituída basicamente por 50% de carbono, 44% de oxigênio e

6% de hidrogênio, além de pequenas quantidades de elementos inorgânicos (ROWELL et al., 2005), sendo que para uso energético o carbono e o hidrogênio são os elementos mais importantes.

A densidade ou massa específica reflete a quantidade de massa em um determinado volume, a um dado teor de umidade e pode ser expressa em  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$  (RODRIGUES, 2009). A exceção à dependência da umidade é a densidade básica que relaciona a massa seca a 0% e o volume completamente saturado (RODRIGUES, 2009).

Madeira com maior densidade tem maior relevância para uso energético, pois apresenta vantagens como: menor área de estocagem e manuseio; maior rendimento energético no transporte e maior rendimento das caldeiras para queima direta (PEREIRA et al., 2000). A densidade também é uma característica determinante para identificar espécies produtoras de carvão de boa qualidade (SANTOS, 2008).

O poder calorífico é uma das propriedades mais importantes na avaliação energética de um material e está relacionado à quantidade de energia liberada por unidade de massa da matéria, quando submetida ao processo de combustão completa (RODRIGUES, 2009).

Na madeira, o poder calorífico superior pode variar de 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg e apresenta-se maior em coníferas, devido ao maior teor de lignina e presença de resina que possui poder calorífico médio de 9.460 kcal/kg (BRITO & BARRICHELO, 1979), no entanto as coníferas são menos utilizadas para energia, pois possuem baixa densidade. De acordo com Pereira et al., (2009), o poder calorífico superior da madeira de eucalipto varia na faixa de 4.400 a 4.800 kcal/kg, como o *Eucalyptus grandis da região do cerrado*, segundo Vale et al. (2001), com 4.641 kcal/kg ou 19,42 MJ/kg.

A densidade energética, produto entre o poder calorífico e a densidade do combustível, é um importante parâmetro para avaliar combustíveis sólidos, pois indica a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material. A baixa densidade energética da biomassa em relação a fontes fósseis, implica em altos custo de transporte e armazenamento (COUTO et al., 2004) e assim, o uso de tratamentos térmicos são fundamentais para o aumento do uso da biomassa como fonte energética.

### **2.3.2 Madeira uso energético**

A participação da biomassa florestal para produção bioenergética é muito relevante, com destaque para o uso energético da madeira, na forma de lenha, transformada em carvão vegetal e no processada para produção de cavacos, briquetes e pellets (PROTÁSIO et al., 2015).

Algumas espécies agrícolas e florestais têm maior potencial de fornecimento de biomassa para energia; estas espécies são chamadas culturas energéticas e devem possuir determinadas características, tais como a adaptação ao ambiente de crescimento, resistência a patógenos e ao clima, além de boas características como uma fonte de energia (PÉREZ et al., 2011; ZALESNY et al., 2011).

O Brasil é um dos poucos países que apresenta grande potencial de expansão de uso e produção de biomassa para fins bioenergéticos, devido à grande disponibilidade de áreas de cultivo e a intensa geração de resíduos lignocelulósicos (ROUSSET et al, 2013). Destaca-se por possuir a segunda maior área florestal do mundo, totalizando 463 milhões de hectares de floresta, o que representa 54,4% do território nacional, atrás apenas da Rússia. Desse total, 456 milhões de hectares são compostas de florestas naturais e 7,2 milhões de hectares correspondem a florestas plantadas (SFB, 2013).

### **2.3.3 Eucalipto**

O eucalipto é uma espécie originária da Austrália, de porte arbóreo, onde formam densos maciços florestais. No Brasil, as primeiras evidências de plantações ocorreram no jardim botânico em 1825 no Rio de Janeiro, destinada para ornamentação ou para servir de quebra ventos. Apenas no século XX, o silvicultor Edmundo Navarro de Andrade, após estudar espécies nativas e exóticas optou pelo plantio econômico de eucalipto, para produção de lenha para as antigas locomotivas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro (PEREIRA et al., 2000).

O gênero *Eucalyptus* é um importante fornecedor de matéria-prima para diversas finalidades industriais, como produção de lenha, carvão, papel e celulose (BRITO & BARRICHELO, 1979). Este fato está relacionado com a sua grande variabilidade genética, uma vez que, são centenas de espécies/clones com propriedades físicas e químicas diversas. Muitas dessas espécies se adaptaram muito bem as condições edafoclimáticas do Brasil, e passaram a ser utilizadas largamente para diversas finalidades (PEREIRA et al., 2000).

Algumas características fazem com que haja uma preferência por esse gênero, como a possibilidade de obtenção de vários produtos, à alta taxa de crescimento, facilidade de rebrotação

e variações na densidade da copa, o que facilita a disponibilidade de radiação solar incidente no sub-bosque, viabilizando o estabelecimento das espécies forrageiras e a sustentabilidade do sistema (OLIVEIRA et al., 2007). Outras qualidades como a excelente produção volumétrica e a boa qualidade da madeira, fruto do intenso melhoramento genético realizado com a espécie e do manejo adequado dos povoamentos, são determinantes para que o eucalipto seja a espécie mais plantada no Brasil (GOULART et al., 2003).

O Brasil detém a melhor tecnologia de implantação, condução e exploração de florestas de eucalipto. Dessa forma, o aumento da produção, pode vir a ser um importante incremento nas exportações brasileiras e diminuição de importações de produtos que podem ser substituídos pela madeira, principalmente os energéticos (COUTO et al., 2001).

## **2.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA**

A biomassa possui algumas características não desejáveis para um combustível, como alta heterogeneidade, alto teor de umidade, baixo poder calorífico, natureza higroscópica e grande volume ou baixa densidade aparente, bem como dificuldades na coleta, moagem, armazenamento e transporte (CHEN et al., 2015). Portanto a conversão energética da biomassa é necessária para uma melhor adequação do uso final como combustível.

Segundo Nogueira et al, (2000), os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em processos físicos, termoquímicos e biológicos. Nos processos físicos, basicamente não há alteração da composição química da biomassa, caracterizando por processos de densificação energética, redução granulométrica e prensagem para obtenção de óleos vegetais.

Os processos biológicos são realizados com temperaturas próximas ao ambiente e umidades altas com a presença de agentes biológicos como as leveduras. A fermentação alcoólica e a digestão anaeróbica os métodos mais utilizados (COUTO et al., 2004).

Os processos termoquímicos têm por características a utilização do aquecimento térmico e geralmente é realizado sob baixo teor de umidade, sendo os processos mais comuns para as biomassas dendrológicas e tendo a combustão direta, gaseificação, pirólise e a liquefação os métodos mais utilizados (COUTO et al., 2001).

## 2.5 PROCESSOS TERMOQUÍMICOS

Dentre os processos de valorização energética da biomassa, a conversão por via termoquímica é uma das melhores alternativas, pois obtém produtos sólidos, líquidos ou gasosos com altas concentrações de energia ou produtos químicos desejáveis a depender do tipo de tecnologia empregada (COUTO et al., 2004).

A combustão, tecnologia de conversão mais antiga e aplicada comercialmente pode ser definida como a queima direta da biomassa, a partir de reações exotérmicas completas e incompletas ocorrendo basicamente em 6 etapas: secagem, pirólise com emissão de voláteis, ignição de voláteis, queima de voláteis em chama, extinção da chama e dos voláteis e finalizando com a combustão do resíduo do carbono (NOGUEIRA et al., 2000).

A pirólise convencional é um processo físico-químico, realizado em temperaturas que variam de 350 a 650°C, que consiste na degradação térmica de um combustível sólido, na ausência de agentes oxidantes, dando origem a um material sólido rico em carbono e um grande número de compostos químicos. Para a engenharia, os produtos da reação podem ser classificados em gases permanentes, líquido pirolenhoso e carvão, ou simplesmente em uma fração volátil, composta de gases e vapores orgânicos condensáveis e carvão (DI BLASI, 2008).

A torrefação é considerada uma pirólise branda, que diferente da pirólise convencional, é realizada em baixas temperaturas (200 a 300°C) e visa a degradação da hemicelulose para saída de voláteis de baixo poder calorífico. É bastante utilizada como um pré-tratamento para utilização da biomassa na gaseificação (COUTO et al., 2004).

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em um gás energético, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, tais como reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás produzido tem muitas aplicações práticas, desde a combustão em motores ou em turbinas para a geração de potência, energia elétrica, em bombas de irrigação, para a geração direta de calor, ou como matéria-prima na síntese química da amônia e do metano (CORTEZ et al., 2008).

## **2.6 TORREFAÇÃO**

### **2.6.1 Histórico**

O Termo torrefação era utilizado antes do século XX na França para denominar processos de intenso aquecimento, com a finalidade de eliminar a umidade de alguns materiais, como alguns produtos químicos, grãos e ouro (LUENGO et al., 2008).

O princípio de torrefação tornou-se conhecido como pré-tratamento de madeira na década de 1930 na França quando a produção de madeira torrificada foi pesquisada para uso em gaseificador (ACHARYA et al., 2012).

Com o surgimento da segunda guerra mundial na década de 40, foram propostos diferentes procedimentos e tecnologias para produzir combustíveis torrificadas, uma vez que havia necessidade de obter alternativas aos combustíveis derivados do petróleo. Nesse contexto, houve o desenvolvimento do método de torrefação com a finalidade de melhorar as propriedades da madeira para serem usadas nos gasogênios, que porventura produziriam gás para substituir os derivados do petróleo (LUENGO et al., 2008).

Com o final da guerra, o interesse pela torrefação diminuiu com os baixos preços do petróleo e o desuso dos gasogênios. Na década de 1980, a torrefação volta a ter visibilidade quando há um interesse em substituir carvão por madeira torrificada na metalurgia de transformação. Nesse período foram redefinidos alguns conceitos e procedimentos para a torrefação, estabelecendo-se de forma precisa os parâmetros e as características do processo (LUENGO et al., 2008) e a construção da primeira fábrica na França pela empresa francesa Pechiney (ACHARYA et al., 2012).

Nos últimos anos, as pesquisas sobre torrefação foram voltadas para melhorar o desempenho da gaseificação e a produção de madeira torrificada de qualidade para substituir carvão térmico e carvão metalúrgico em usinas e altos-fornos. A cinética da torrefação também tem sido sistematicamente investigada, utilizando espécies de biomassa variadas em ambientes tanto inertes (uso de N<sub>2</sub>) quanto oxidativos (CHEN et al, 2015).

### **2.6.2 Conceito e objetivo**

Torrefação refere-se a um pré-tratamento termoquímico, onde a biomassa é aquecida numa atmosfera inerte ou com presença reduzida de oxigênio, a temperaturas que variam de 200 a 300°C para melhorar a qualidade energética e hidrofóbicas da biomassa sólida (ACHARYA et

al., 2012; TRAN et al., 2013). É uma pirólise leve ou branda, uma vez que, é conduzida em condições semelhantes com às da pirólise convencional (350 a 650°C), porém em menores temperaturas e em geral com utilização de nitrogênio em testes de laboratório para proporcionar um ambiente não oxidante (CHEN et al, 2015).

O objetivo fundamental da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto (DOAT, 1985).

Pesquisas recentes sugerem que, a torrefação propicia uma melhora nas propriedades energéticas da biomassa (CHEW & DOSHI, 2011). Os benefícios alcançados pela torrefação incluem maior poder calorífico e densidade energética; menor razão atômica de O/C e H/C; baixo teor de umidade; maior hidrofobicidade ou resistência a água; melhoramento da moagem e reatividade; e maior homogeneidade das propriedades da biomassa.

A figura 2.2 mostra um resumo das mudanças nas propriedades da biomassa após o processo de torrefação.

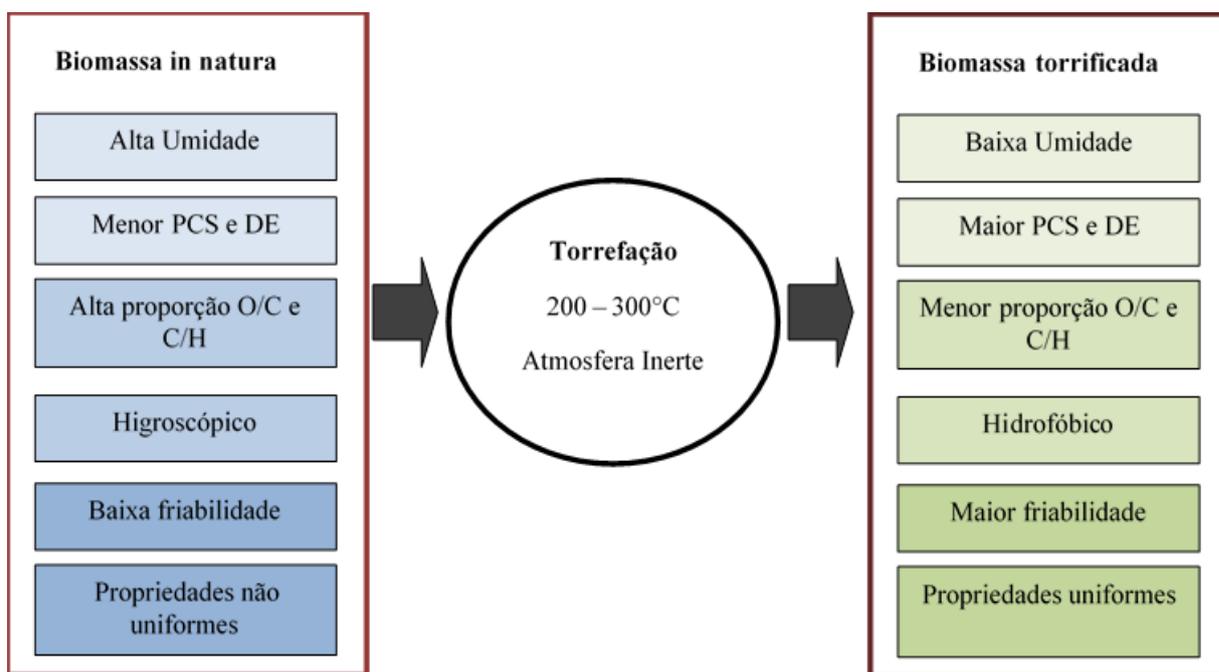


Figura 2.2 Variação das propriedades da biomassa submetida à torrefação (CHEN et al., 2015 - adaptado).

### 2.6.3 Características e parâmetros da torrefação

A compreensão das características e os principais parâmetros que afetam o processo da torrefação é fundamental para obtenção de um combustível sólido com características desejáveis.

Dentre os principais fatores que afetam o produto da torrefação estão a temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, umidade, biomassa e tamanho da partícula ou sólido (CHEN et al., 2015).

A temperatura é o principal parâmetro que altera as características e o produto da torrefação, e tem um efeito significativo no grau de decomposição da biomassa. No processo de aquecimento de materiais lignocelulósicos, a decomposição estrutural do polímero do material passa por fases de degradação com o aumento da temperatura (ACHARYA et al., 2012).

O processo de torrefação da biomassa pode ser classificado em leve, moderado ou severo, de acordo com a faixa de temperatura final utilizada, correspondendo as temperaturas entre 200 e 235°C, 235 a 275°C e 275 a 300°C respectivamente (CHEN & KUO, 2011). Temperaturas superiores a 300°C não são recomendadas devido à grande liberação de alcatrão e tendência de perda da densidade energética (CARNEIRO et al., 2014).

Na torrefação leve, a hemicelulose é o produto termicamente mais degradado, enquanto a celulose e a lignina são pouco afetadas, ocorrendo baixa perda de massa e pouco aumento do poder calorífico. Na torrefação moderada a decomposição de hemicelulose e a liberação de voláteis são intensificadas e há também uma gradual perda de celulose, enquanto que na torrefação severa, a hemicelulose está quase totalmente degradada e a celulose sofre grande decomposição (CHEN et al., 2015). Já a lignina é o constituinte mais difícil de ser degradado termicamente no processo de torrefação (ROUSSET et al., 2004).

O combustível sólido é o principal produto da torrefação, embora também sejam obtidos gases condensáveis (produtos líquidos) e não condensáveis (HUANG et al., 2012). O produto do gás não condensável compreende principalmente monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e pequenas quantidades de metano (CH<sub>4</sub>), tolueno, benzeno e hidrocarbonetos de baixo peso molecular (BERGMAN et al., 2005b). Os gases liberados na torrefação possuem baixo poder calorífico, a sua aplicação energética é limitada. O produto líquido obtido possui cor marrom claro, marrom escuro ou preta, dependendo da temperatura de torrefação (CHEN e KUO, 2011) e consiste em componentes condensáveis, como água, ácidos acéticos, álcoois, aldeídos e cetonas (PRINS et al., 2006a).

No processo de torrefação, a umidade e os voláteis leves, que contêm mais hidrogênio e oxigênio, são removidos da biomassa, enquanto que o carbono é mais retido. Isso resulta na carbonização leve ou suave da biomassa e como consequência, as razões atômicas O/C e H/C são diminuídas para 0,1-0,7 e 0,7-1,6, respectivamente (CHEN et al., 2015).

A tabela 2.2 apresenta um resumo do efeito da temperatura sobre a degradação dos componentes da madeira e os produtos formados na torrefação.

Tabela 2.2 Classificação e efeitos da temperatura nos componentes e nos produtos formados no processo de torrefação (CHEN et al., 2015 - adaptado).

<b>Classificação</b>	<b>Leve</b>	<b>Moderada</b>	<b>Severa</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	200 – 235	235 – 275	275-300
<b>Degradação</b>			
Hemicelulose	Leve	Moderada - severa	Severa
Celulose	Branda	Leve - moderada	Leve – severa
Lignina	Branda	Branda	Branda
<b>Cor do líquido</b>	Marrom	Marrom escuro	Preto
<b>Produto</b>			
Gás	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , tolueno, benzeno e C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>		
Líquido	H <sub>2</sub> O, ácidos acético, álcoois, aldeídos e cetonas		
Sólidos	Biomassa torrificada e cinzas		

A degradação de alguns dos seus componentes químicos, por meio do aquecimento da madeira também produz alterações nas propriedades mecânicas, principalmente quando submetidos a altas temperaturas (CALONEGO et al., 2013).

As propriedades físicas e químicas da biomassa torrificada variam com o incremento da temperatura. Por exemplo, ao aumentar a temperatura do processo, a biomassa se torna mais friável e menos higroscópica. Para cada combinação de temperatura e tempo de residência, pode-se obter produtos de diferentes propriedades que podem ser reproduzidos com alta precisão. A densidade energética e os teores de carbono fixo aumentam quando são incrementados os parâmetros de temperatura e tempo (FELFLI et al., 2000).

Além da temperatura, o tempo de residência ou patamar, é outro fator importante na determinação do desempenho de torrefação e pode permanecer por vários minutos ou até por várias horas (WANNAPEERA et al., 2011).

No entanto, a degradação térmica é lenta em períodos longos de tempo de residência (acima de 1 hora) e quanto maior o patamar, maior será o gasto de energia na torrefação. Em geral,

em condições normais de funcionamento, a influência da temperatura de reação sobre as propriedades da biomassa prevalece sobre o tempo de residência (CHEN et al, 2015).

A redução do teor de umidade da biomassa desempenha um papel fundamental para aumentar a eficiência energética e melhorar a qualidade dos produtos energéticos no processo de conversão de energia termoquímica. A torrefação altera a natureza higroscópica da biomassa para hidrofóbica pela destruição, por desidratação, dos grupos hidroxilas (OH), evitando a formação de ligações de hidrogênio de modo que o teor de umidade na biomassa seja significativamente reduzido (BERGMAN & KIEL, 2005).

O menor teor de umidade na biomassa torrificada também pode ser resultado da condensação do alcatrão dentro dos poros, obstruindo a passagem do ar úmido através do sólido e evitando a condensação do vapor de água. O caráter apolar do alcatrão condensado no sólido também evita a condensação do vapor de água dentro dos poros (FELFLI et al., 2005).

Biomassas com menor teor de umidade reduz o custo do transporte, além de ser armazenada de forma estável durante um período prolongado de tempo, com baixo risco de deterioração biológica (CHEN et al, 2015).

A torrefação também proporciona um bom rendimento energético onde verifica-se que aproximadamente 70% da massa é mantida como combustível sólido, porém há a manutenção de 90% do conteúdo em energia. Os 30% da massa liberados no processo de torrefação são convertidos em voláteis, contendo apenas 10% de conteúdo energético (BERGMAN et al., 2005b). A figura 2.3 ilustra o balanço de massa e energia no processo de torrefação.

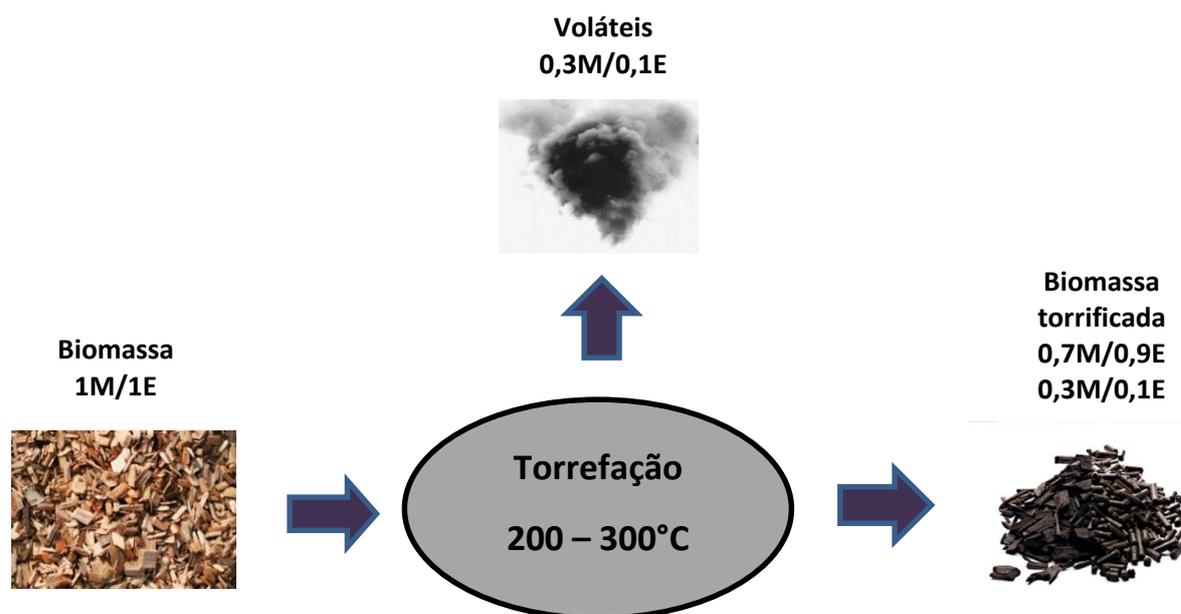


Figura 2.3 Balanço de massa/energia do processo de torrefação (BERGMAN et al., 2005b - adaptado).

De acordo com Prins et al. (2006b), a madeira torrificada, dependendo do incremento da temperatura do processo, mantém entre 70% e 90% da massa inicial, com diminuição de 80% para 60-75% do teor de materiais voláteis e de 10% para 3% seu teor de umidade. Os Balanços de massa e de energia mostram a importância da temperatura final no processo de torrefação, uma vez que temperaturas mais altas geram maior formação de voláteis, portanto maiores perdas de massa (CIOLKOSZ & WALLACE, 2011).

#### 2.6.4 Tecnologias de torrefação

Os principais projetos de torrefação industrial estão sendo desenvolvidos por mais de 60 empresas de tecnologias e instituições de pesquisa localizados na Europa e América do Norte devido ao seu potencial econômico (SCHORR et al., 2012).

Grande parte das tecnologias patenteadas ou em desenvolvimento para torrefação são na sua maioria baseadas em conceitos de reatores já existentes e destinados para outros fins, como a secagem ou a pirólise (BATIDZIRAI et al., 2013).

Portanto, a seleção adequada do reator é importante, pois cada equipamento possui determinadas características para lidar com tipos específicos de biomassa que irão melhorar a qualidade dos produtos torreficados a baixo custo (ACHARYA et al., 2012).

Assim, não há um reator ou tecnologia superior que a outra, exige apenas que seja observada as melhores características e objetivos para qual se deseja a torrefação. As principais tecnologias conhecidas para reatores industriais de torrefação, bem como suas vantagens e desvantagens são apresentadas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Principais vantagens e limitações de diferentes tipos de reatores industriais utilizados para torrefação de biomassa energética (ACHARYA et al., 2012 - adaptado).

<b>Tipo de Reator</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Tambor Rotativo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamento relativamente simples.</li> <li>- Perda de pressão.</li> <li>- Possibilidade de aquecimento direto e indireto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa transferência de calor (especialmente em sistemas de aquecimento indireto).</li> <li>- Dificuldade na medição e controle da temperatura.</li> <li>- Maior tamanho do sistema.</li> <li>- Necessária vedação adequada do cilindro.</li> <li>- Sistema de difícil de ampliação.</li> </ul>
Leito Móvel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de fácil operação e construção simples.</li> <li>- Boa transferência de calor.</li> <li>- Leito de alta densidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Queda de pressão significativa.</li> <li>- Difícil controle da temperatura.</li> </ul>
Tipo Parafuso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluxo empistonado.</li> <li>- Tecnologia madura para torrefação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apenas aquecimento indireto.</li> <li>- Maior possibilidade de “hot spots”.</li> <li>- Baixa taxa de transferência de calor.</li> <li>- Dificuldade de <i>scale-up</i>.</li> <li>- Requer adequada vedação do eixo.</li> </ul>
Forno de Múltiplo Aquecimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Design de equipamento comprovado para secagem.</li> <li>- Grande possibilidade de <i>scale-up</i>.</li> <li>- Fácil controle de temperatura e tempo de residência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor taxa de transferência de calor em comparação com outros reatores diretos.</li> <li>- Capacidade volumétrica limitada.</li> <li>- Reatores relativamente maiores.</li> <li>- Requer adequada vedação do eixo.</li> </ul>
Leito Fluidizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente taxa de transferência de calor.</li> <li>- Fácil transposição de escala.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige menor tamanho de partícula.</li> <li>- Necessidade de gás de arraste.</li> <li>- Necessidade de sistema adicional para fluidização.</li> <li>- Dificuldade de fluxo empistonado.</li> </ul>

Alguns reatores de bancada também foram desenvolvidos e são utilizados em pesquisas para melhor conhecimento do processo, melhoria dos parâmetros da torrefação e nas propriedades energéticas da biomassa. Os reatores podem ser classificados como de aquecimento direto, onde o meio de aquecimento (fluido) entra em contato direto com a biomassa ou indireto,

onde a transferência de calor para biomassa é realizada pelo processo da condução, ou seja não há contato direto da biomassa com o meio de aquecimento (BERGMAN et al., 2005b).

Os tipos mais comuns de reatores utilizados na torrefação são o de aquecimento por convecção e de leito fluidizado (aquecimento direto), de tambor rotativo (aquecimento indireto) e o reator de micro-ondas (aquecimento volumétrico). O reator de aquecimento direto tem uma melhor e mais uniforme transferência de calor, enquanto que no aquecimento indireto, os voláteis não são diluídos pelo fluido de aquecimento, e podem ser facilmente utilizados na combustão (CARNEIRO et al. 2014). A tabela 2.4 apresenta os principais reatores de bancada com suas características, vantagens e desvantagens.

Tabela 2.4 Modelos de reatores para torrefação em escala de bancada (CARNEIRO et al., 2014).

<b>Tipo de Reator</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Limitações</b>	<b>Características</b>
Aquecimento convectivo	- Maior ocorrência de reações exotérmicas, elevando a temperatura do núcleo da biomassa.	- Possível ocorrência de variações de temperaturas ao longo do reator.	- Os gases inertes aquecidos passam por meio de um leito empacotado ou fixo; - Reator vertical ou grelha horizontal; - Transferência de calor de forma indireta, ocasionando um maior gasto energético.
Tambor rotativo	- Possibilidade de aquecimentos direto e indireto da biomassa	- Dificuldade no controle de temperatura; - Ocorrência de calor radiativo na superfície do tambor.	- Aquecimento direto ou indireto da biomassa, podendo ainda um modelo híbrido; - Constante mistura da biomassa.
Leito fluidizado	- Elevada taxa de transferência de calor.	- Dificuldade na separação de material do leito, caso seja utilizado, a partir de biomassa; - Arraste de partículas finas.	- Elevado coeficiente de transferência de calor e uniformidade da temperatura no leito; - Alta qualidade da biomassa torrefeita.
Micro-ondas	- Menor tempo de aquecimento e uniformidade da temperatura; - Design compacto.	- Sistema conceitual, com avaliações apenas qualitativas	- Atrito das moléculas (300 MHz a 300 GHz); - Reator de aquecimento volumétrico.

A biomassa torrificada pode ser utilizada em briquetagem, peletização, gaseificação e plantas de co-combustão para geração de energia térmica (BRIDGEMAN et al, 2010).

## 2.7 ACÚSTICA

A palavra acústica, originada do grego, começou a ser utilizada em 1701, com a realização dos primeiros trabalhos científicos desenvolvidos por Newton e Galileo. A teoria da propagação, como é conhecida nos dias atuais, passou a ser construída a partir do século XIX, pela teoria ondulatória desenvolvida por Fourier, Fresnel e Laplaces. Durante o século XX, com o desenvolvimento das diversas áreas associadas como, eletrônica e instrumentação, foi possível uma notável aplicação da acústica às diversas áreas do conhecimento (MEDEIROS, 2002).

Acústica é conceituada como a ciência do som, incluindo sua produção, transmissão e efeitos de acordo com a norma da American National Standards Institute (ANSI), onde a ondulatória é a parte da física que estuda os fenômenos que se apresentam em formas de ondas (MEDEIROS, 2002).

Existem dois tipos básicos de fenômenos de ondas, classificadas em ondas mecânicas, que atuam no nível das moléculas, cujo fenômeno perceptivo associado é o som; e as ondas eletromagnéticas, causadas pelo movimento de partículas sub-atômicas, cujos fenômenos perceptivos estão ligados, principalmente, a luz e as cores (LAZZARINI, 1988).

As ondas sonoras são longitudinais de compressão que se propagam através de um meio físico como ar e a água. A passagem da onda sonora permite que as partículas deste meio vibrem, ocasionando colisões entre elas. Assim, a onda sonora pode ser descrita a partir de suas propriedades físicas, como velocidade, direção, amplitude e período, além de outras propriedades relacionadas a essas, como frequência e comprimento de onda acústica (MEDEIROS, 2002).

A intensidade do som diz respeito a amplitude da onda sonora, que caracteriza a variação de pressão do meio em que se verifica a sua propagação. A frequência de uma onda sonora corresponde ao número de vibrações completas executadas pela mesma em um segundo, sendo medida em hertz (Hz) (COSTA, 2003).

No campo da combustão, Zinn (1996), informa a presença de escoamento pulsado, viabiliza vantagens sobre o processo de combustão comum, como uma maior taxa de transferência de calor convectiva, aumento da produtividade, economia de combustível, menor emissão de poluentes e menores investimentos de capital.

Conforme Libby e Williams, (1994) nos processos de combustão comuns não há correlações entre as flutuações de um ponto a outro dentro de uma câmara de combustão com exceção da turbulência causada pela própria estrutura, enquanto que na combustão pulsante, as variáveis de estado (pressão, temperatura e etc...), acontece em circunstâncias oscilatórias, ou seja, variando com tempo (ZINN, 1996).

Alguns trabalhos comprovam as vantagens da combustão pulsante em relação à combustão tradicional. Hanby, (1969) utilizou um modelo quase estacionário e mesmo assim verificou que a presença de oscilações aumenta os coeficientes convectivos de transferência de calor e possibilita aumento da eficiência térmica.

Oliveira et al (2009), utilizaram experimentalmente oscilações acústicas na formação de fuligem em uma chama difusiva, indicando que a combinação de frequência e amplitude de oscilação na chama reduz a presença de fuligem praticamente à zero.

Lacava et al, (1999) testaram o efeito da amplitude e frequência no formato de uma chama pré-misturada de gás liquefeito de petróleo (GLP), verificando que a amplitude tem influência no comprimento da chama em baixas frequências.

Komarov e Hirasawa (2003) discutiram a possibilidade de aumento da transferência de calor entre sólidos e gás ambiente por aplicação de campo acústico poderoso. Os resultados mostraram que a taxa de transferência de calor entre um fio pré-aquecido e gás ambiente pode ser aprimorada sob a aplicação de ondas sonoras.

Bennett et al. (2009), em uma investigação preliminar, demonstraram como a transferência de calor convectiva da seção de duto aquecida para o fluxo interno é melhorada devido à excitação acústica.

No entanto, não foram encontrados trabalhos na literatura que demonstrem o processo de torrefação sob pirólise combinada com um campo acústico e seus efeitos nas propriedades da biomassa torreficada. O pressuposto é que um campo acústico em um reator de torrefação modifica a pressão e o campo de velocidade do fluxo das partículas em torno da amostra de madeira. O efeito combinado do calor e da acústica pode modificar a interação entre o ambiente gasoso do reator e a amostra de madeira, modificando os processos de degradação térmica da biomassa.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 ESPÉCIE, ORIGEM E PREPARO DOS CORPOS DE PROVA**

Para a realização deste estudo foi escolhida a madeira da espécie *Eucalyptus grandis* (eucalipto), por apresentar características desejáveis para aproveitamento energético, como rápido crescimento e boa densidade, sendo referência, tanto em trabalhos de pesquisa, como na produção de madeira para fins energéticos.

Dessa forma, foi selecionado, aleatoriamente, um indivíduo na fazenda Água Limpa (FAL), de propriedade da Universidade de Brasília (UnB), localizada na cidade de Brasília, no Distrito Federal, em um plantio com idade de 15 anos. Foram evitadas árvores das bordas e aquelas que apresentavam doenças ou outras imperfeições visíveis. O tronco foi cortado em seis partes de aproximadamente 1,5 metros. O desdobro foi realizado na própria fazenda e as toras cortadas em blocos, eliminando as cascas (figura 3.1). Os blocos de madeira foram transformados em estacas na marcenaria do Laboratório de Produto Florestais (LPF), do Serviço Florestal Brasileiro (SBF) e foram alocadas na sala de climatização na área de Engenharia da Madeira do LPF para garantir a estabilização da umidade em torno de 12%, por um período aproximado de 90 dias.

A partir destas peças foram confeccionados corpos de prova em formatos cúbicos, nas dimensões de 3 x 3 x 3 cm. De modo a minimizar os efeitos da heterogeneidade da madeira, as amostras tiveram seu corte orientado, preservando somente a parte do cerne, sendo descartada qualquer parte do alburno e a casca (figura 3.1).



Figura 3.1 Preparo dos corpos de prova. A) abate da espécie *Eucalyptus grandis* na FAL. B) retirada das costaneiras e formação de bloco. C) desdobro da madeira na carpintaria do LPF. D) Amostras confeccionadas em formato cúbico 3 x 3 x 3cm.

### 3.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO

Os ensaios de torrefação foram realizados na Área de Energia da Biomassa do LPF/SFB, a partir de uma estufa adaptada para ensaios de pirólise branda, limitada a temperatura máxima de 320°C (figura 3.2).



Figura 3.2 Reator de torrefação instalado na área de energia do LPF

### 3.2.1. Reator de Torrefação

O reator utilizado possibilita trabalhar com diferentes rampas e patamares de aquecimento, por estar interligado a controladores e a um computador pelo software labview. A seção de tratamento térmico, é composta por uma câmara, um suporte para a amostra de madeira e duas resistências elétricas. O controlador PID programável (proportional-integral-derivative) é responsável por controlar as temperaturas e a taxa de aquecimento dentro do reator. O equipamento permite medições, em tempo real, de perda de massa das amostras, uma vez que possui balança com 0,01 gramas de sensibilidade, protegida por vidro acrílico contra oscilações e efeitos do alcatrão gerados nos ensaios. Há ainda, a garantia do controle do teor de oxigênio dentro do reator, por meio de injeção de nitrogênio controlado por um analisador de oxigênio, em tempo real. Ao todo, o equipamento possui entrada para quatro termopares, capazes de medir temperaturas em diferentes posições dentro do reator a cada 30 segundos.

O subsistema acústico é composto por um gerador de sinais e um alto-falante capazes de emitir frequências e amplitudes variadas para dentro do equipamento. O alto-falante está posicionado na parte superior externa do reator, sendo que um tubo de plástico, inserido em uma abertura na parte superior, faz conexão de fora para dentro do equipamento.

O reator de escala laboratorial utilizado para realizar experimentos de torrefação sob influência acústica está ilustrado figura 3.3. O dispositivo envolve quatro subsistemas: acústico (A), tratamento térmico (B), energia e gravação (C) e alimentação de gás (D).

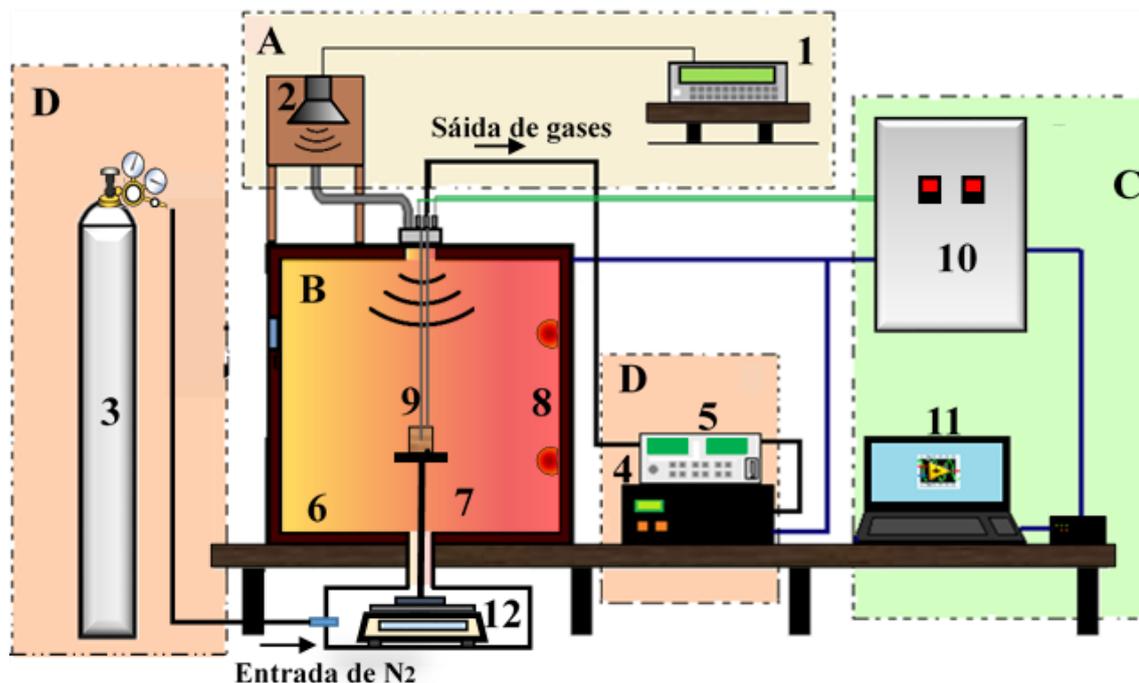


Figura 3.3 Diagrama geral do sistema experimental de torrefação: 1) Gerador de ondas acústica; 2) alto-falante sonoro 3) cilindro N<sub>2</sub>; 4) bomba de gás; 5) controle de O<sub>2</sub>; 6) Câmara do reator; 7) suporte de amostra; 8) Resistências elétricas para aquecimento por convecção; 9) Termopares; 10) Controle do sistema; 11) Computador; 12) balança analítica. Esquema proposto por: Edgar Amaral Silveira

### 3.2.2. Detalhamento dos parâmetros do experimento

Para os ensaios de torrefação foram definidos dois fatores a serem estudados, temperatura e acústica. Para tanto, foram utilizadas duas temperaturas (250 e 270°C) quatro frequências sonoras, sendo duas abaixo de 2000 hertz (Hz) classificadas como baixas, (1411 e 1810 Hz), duas altas, acima de 2000 Hz, (2478 e 2696 Hz), e a testemunha (sem efeitos da acústica). As frequências foram selecionadas a partir de um estudo em andamento no programa de pós-graduação em Ciências Mecânicas da UnB<sup>1</sup>, que desenvolveu e implementou um sistema acústico no reator de torrefação do LPF para receber ondas sonoras dentro da câmara, com

<sup>1</sup>.Estudante Edgar Amaral Silveira, doutorando do programa de pós-graduação em Ciências Mecânica da Universidade de Brasília. (email: edamaral@hotmail.com)

determinação das frequências que atingiam, com maior intensidade, o centro do reator, limitado a uma área equivalente a uma esfera de 6 cm de diâmetro, largura do suporte das amostras (SILVEIRA et al., 2017).

As dimensões das amostras (3 x 3 x 3 cm) foram definidas neste estudo para que as duas amostras posicionadas no suporte do reator pudessem sofrer máxima influência acústica e para garantir uma quantidade mínima de amostra torrificada para posteriores análises das propriedades energéticas.

Para cada frequência sonora foram realizadas 5 repetições para duas temperaturas finais, 250°C e 270°C e comparadas com a testemunha. A amplitude da frequência foi constante e igual a 10 volts (capacidade máxima do gerador de sinais) e com controle de oxigênio, limitado a 10% do ambiente.

O controle de oxigênio foi definido, de modo a prover um ambiente parcialmente inerte e evitar a combustão de produtos voláteis formados durante a degradação da madeira (ROUSSET et al., 2012). A taxa de aquecimento foi padronizada a 5°/min para todos os ensaios até atingir a temperatura determinada (250° ou 270°C), permanecendo por 60 minutos neste patamar.

A tabela 3.1 resume a dinâmica dos tratamentos, com suas respectivas frequências, as temperaturas finais as quais as amostras foram submetidas, tempo de secagem para obter madeira a 0% de umidade e o tempo de residência (patamar) sob a qual os corpos de prova permaneceram sob a temperatura final.

Tabela 3.1 Dinâmica das variáveis nos ensaios de torrefação.

Espécie	Temperaturas	Tratamentos	Secagem	Taxa de aquecimento	Patamar de torrefação
<i>Eucalyptus grandis</i>	250°C	T1 –Testemunha (sem acústica)	Até massa constante (0% umidade)	5°C/min.	60 min.
		T2 – freq. 1411 Hz			
	270°C	T3 – freq. 1810 Hz			
		T4 – freq 2478 Hz			
		T5 – Freq 2696 Hz			

### 3.2.3. Manuseio dos corpos de prova

Os corpos de prova de dimensões 3 x 3 x 3cm tiveram seus volumes e massas mensuradas com auxílio de balança de sensibilidade de 0,01gramas e paquímetro digital, para determinação das densidades antes da secagem completa na estufa (figura 3.4). Foram selecionadas amostras com intervalos de densidades de 0,75 a 0,82 g/cm<sup>3</sup>, para que houvesse uma homogeneidade mínima e precisão no experimento. Antes dos ensaios de torrefação, os corpos de provas foram colocados em uma estufa com circulação e renovação de ar à 103 ± 2°C, por vinte e quatro horas, até que a massa permanecesse constante, com teor de umidade a 0%.



Figura 3.4 Determinação da densidade aparente da amostra. A) Verificação da massa do corpo de prova. B) Medição do volume com paquímetro digital.

Os volumes e massas das amostras também foram medidos antes e após os ensaios de torrefação, para determinação das densidades e verificar a porcentagem de perda de massa.

### 3.2.4. Posicionamento das amostras no reator

Para cada experimento, duas amostras com características e propriedades físicas semelhantes foram analisadas ao mesmo tempo. A primeira amostra foi posicionada no suporte sobre a balança analítica e a segunda foi suspensa pelos termopares (figura 3.5). Esse procedimento teve por objetivo o registro dos dados da perda de massa e os perfis da temperatura em tempo real, evitando assim, a interferência dos termopares na obtenção dos dados de perda de massa da balança (efeito mola).

Os dois termopares foram posicionados na face longitudinal radial da madeira em locais diferentes: na superfície e no centro da amostra. Foram realizados dois furos, com auxílio de uma

furadeira de bancada: o primeiro na parte superficial (2 mm) e outro no centro da amostra (1,5 cm), onde foram inseridos os termopares (figura 3.5). O objetivo dos furos era obter as temperaturas em tempo real, tanto na superfície, quanto dentro da amostra e observar possíveis reações exotérmicas.

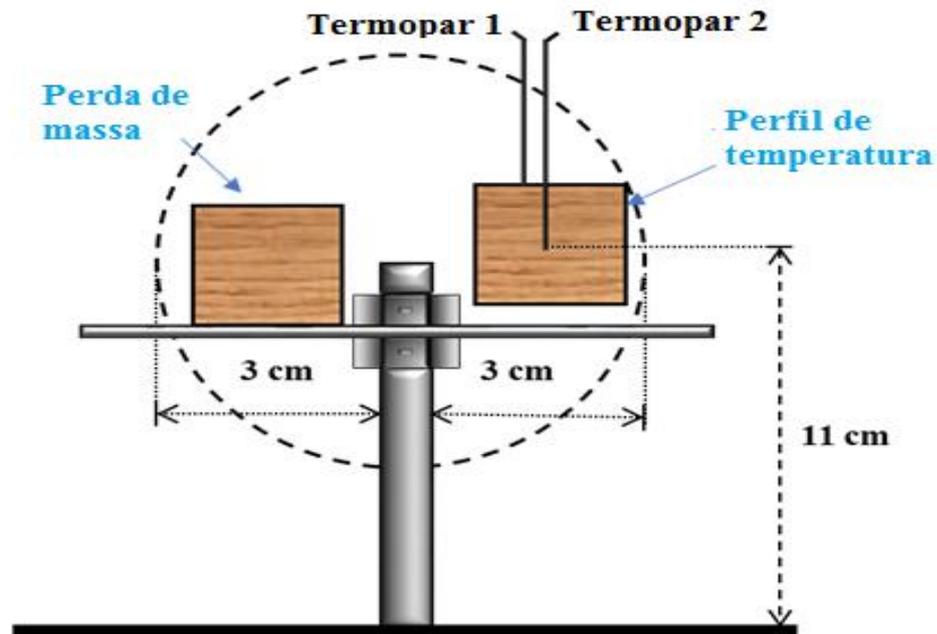


Figura 3.5 Posição das amostras no suporte do reator.

Na figura 3.6 são apresentados os corpos de prova posicionados no reator, ambos com a face transversal voltada para as laterais, com a face longitudinal tangencial para a base superior e inferior e a com a face longitudinal radial para a abertura do equipamento, de modo a facilitar a saída dos gases pela lateral durante os ensaios de torrefação.



Figura 3.6 Posicionamento dos dois corpos de prova no interior do reator

### **3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS**

Os ensaios para determinação das propriedades físicas e químicas foram realizados no setor de energia do LPF, no Departamento de Engenharia Florestal e Instituto de Química da UnB. Os experimentos abrangeram ensaios de compressão paralela às fibras (ensaio mecânico), segundo a norma ASTM D143/2000 com adaptações, análise imediata (teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo), segundo a norma ABNT NBR 8112/86 com adaptações, análise elementar (porcentagem de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) segundo as normas ASTM E777 e E778 e poder calorífico superior segundo norma ABNT NBR 8633 com adaptações para a biomassa in natura e as biomassas pós-torrefação. Foram determinados ainda a densidade aparente, densidade energética, e rendimento gravimétrico das amostras.

#### **3.3.1 Densidade aparente seca (0% de umidade)**

A densidade aparente foi determinada nos corpos-de-prova a 0% de umidade antes e depois do processo de torrefação utilizando a norma COPANT 461, pela razão entre a massa e o volume da madeira. Os corpos-de-prova tiveram suas dimensões, radial, tangencial e longitudinal, aferidas com paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 cm para obtenção do volume, sendo que a massa foi obtida em balança semi-analítica com sensibilidade de 0,01g. Portanto para calcular a densidade aparente utilizou-se a equação 1:

Eq. (1)

$$\rho_{\text{ap}} = \frac{M}{V}$$

$\rho_{\text{ap}}$  : densidade aparente seca específica, g/cm<sup>3</sup> ;

M : massa do corpo-de-prova a 0%, gramas;

V : volume do corpo-de-prova a 0%, cm<sup>3</sup>

### 3.3.2 Compressão Paralela às Fibras

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado em uma máquina universal de ensaio da marca EMIC, modelo DL30000 (figura 3.7), localizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira no Departamento de Engenharia Florestal da UnB, quando foi determinada a carga (F em Kgf) e o módulo de ruptura (MOR em kgf.cm<sup>-1</sup>), a partir da aplicação de carga nas amostras de seção quadrada até a sua ruptura.

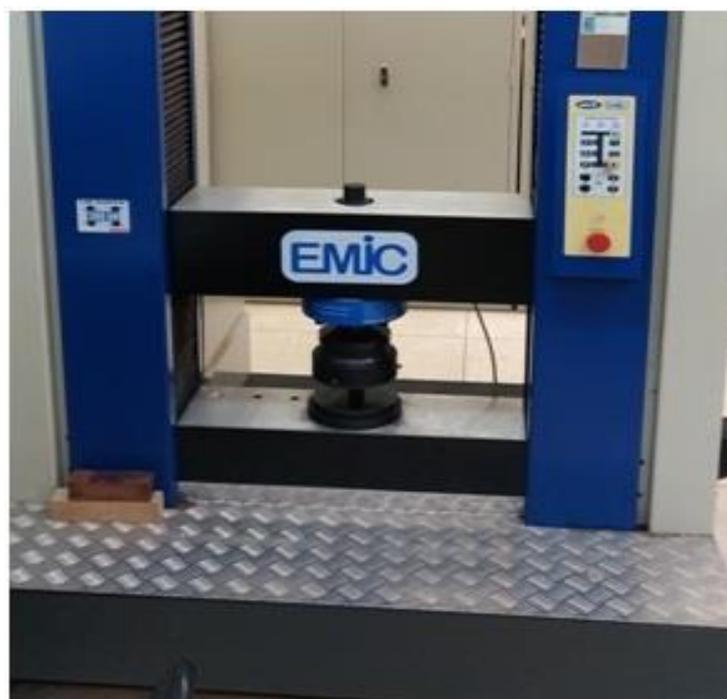


Figura 3.7 Máquina universal de ensaios – EMIC DL30000.

Apesar de ser um teste voltado para resistência e caracterização da madeira, optou-se por realizar esse ensaio, uma vez que o mesmo, permite uma avaliação indireta da friabilidade da madeira sob diferentes temperaturas e submetidos a diferentes frequências acústicas.

Assim, foram submetidos a esse teste, amostras in natura e as utilizadas após torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências sonoras, seguindo a norma ASTM D143/2000. Contudo, como os corpos de provas estavam limitados às dimensões de 3 x 3 x 3cm e o objetivo dos testes era comparação entre fatores (temperatura e frequência) e não a caracterização da espécie, os ensaios não seguiram a norma na sua totalidade. Portanto, as dimensões das amostras foram diferentes ao exigidos pela norma, sendo respeitada a velocidade da carga em 0,6mm/min.

### 3.3.3 Análise Química Imediata

A Análise química imediata compreende a determinação do teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra. Estes valores foram determinados seguindo a norma ABNT NBR 8112/86 com adaptações feitos pelo LPF.

Para a determinação do teor de voláteis, a biomassa foi moída em moinho de facas e peneirada em um agitador de peneiras até que atingissem partículas abaixo de 60 mesh. Após essa etapa, as mesmas foram alocadas na estufa ( $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por 24h até atingir 0% de umidade. A amostra foi retirada da estufa e inserida em dessecador por aproximadamente 15 minutos para resfriamento. Posteriormente, trabalhando em duplicata, mediu-se 1 grama de massa para cada cadinho de porcelana com tampa, que por sua vez, foram inseridos em uma mufla a  $900^{\circ}\text{C}$ , por meio de um suporte para dois cadinhos. As duas amostras foram posicionadas por 3 minutos na tampa da mufla e em seguida por mais 7 minutos no interior da mufla com a tampa fechada. Após esse procedimento, as amostras foram retiradas e inseridas em dessecador para resfriamento. Novamente mediu-se a massa e calculou-se o teor de material volátil com precisão de 2% pela equação 2:

Eq. (2)

$$MV = \frac{M2 - M3}{M1} \times 100$$

MV: teor de material volátil

M1 =: massa da amostra

M2: massa cadinho + amostra

M3: massa do cadinho após mufla à  $900^{\circ}\text{C}$

A determinação do teor de cinzas foi realizada de forma semelhante ao teor de voláteis, sendo diferenciada na etapa em que 1 grama de material é inserido em cada um cadinho de porcelana sem tampa e trabalhando em triplicata. Os mesmos foram posicionados dentro da mufla sob uma temperatura de 700°C com tampa fechada por aproximadamente 5 horas, até que ocorresse a queima completa do material. Posteriormente o cadinho foi transferido para o dessecador para resfriamento e após 15 minutos mediu-se a massa novamente. O teor de cinzas foi determinado com precisão de 10% pela equação 3:

Eq. (3)

$$Cz = \frac{M3 - M2}{M1} \times 100$$

Cz: teor de cinzas

M1 =: massa da Amostra

M2: massa do cadinho

M3: massa do cadinho + resíduo

Com as porcentagens do teor de materiais voláteis (MV) e do teor de cinzas (Cz) consegue-se calcular a porcentagem de carbono fixo pela equação 4:

Eq. (4)

$$CF = 100 - (Cz + MV)$$

### 3.3.4 Análise Elementar

A análise elementar foi determinada por meio de um analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 series II, localizado no Instituto de Química da UnB. O Equipamento possui dois modos de análise, CHN e CHNS, e conta com um forno de alta temperatura para completa combustão das amostras, retenção seletiva dos gases (separação por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica). Possui ainda uma ultra microbalança AD6 (Perkin Elmer) e carrossel para análise automatizada de até 60 amostras (figura 3.8).



Figura 3.8 Analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 series II, localizado no Instituto de Química da UnB.

As análises foram feitas para o material “in natura” e torreficado, a partir de amostras compostas, seguindo a norma ASTM E777/2008 e E778/2008. Assim, para cada fator e tratamento foi misturado 1 grama de material moído de cada repetição abaixo de 60mesh a 0% de umidade, totalizando uma amostra composta de 5 gramas. Aproximadamente 3 gramas dessa mistura do material foram utilizados para realização dos ensaios de análise elementar. O valor do Oxigênio (O) foi obtido por diferença em relação aos outros componentes.

Essa metodologia foi escolhida por ter pouca variação na composição das amostras de cada tratamento, por se tratar de amostras de um mesmo indivíduo previamente selecionadas contendo apenas parte do cerne, com densidades similares (intervalo de 0,5 g/cm<sup>3</sup>) e pelo equipamento possuir uma alta precisão.

### 3.3.5 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior foi obtido por meio de uma bomba calorimétrica da PARR modelo 6400 – Automatic Isoperibol Calorimeter, instalada na área de energia da biomassa no LPF. O equipamento mede a energia gerada pela combustão completa da amostra submetida a uma pressão constante e com injeção de oxigênio para garantir a combustão. O aparelho conta com display digital e geração de gráfico em tempo real durante a queima da amostra, calculando o PCS em Megajoules por quilograma (MJ/Kg). A norma utilizada foi a ABNT NBR 8633/84 adaptada pelo LPF, com precisão entre as amostras de 0,120MJ/kg (figura 3.9).



Figura 3.9 Calorímetro – PARR 6400

Os ensaios também foram realizados com amostras compostas do fator e tratamento pelas mesmas justificativas do item anterior. Assim, foi misturado 1 grama de cada repetição do fator e tratamento no total de cinco. Dessa amostra composta foi retirada aproximadamente 1 grama para confecção de cada pellet (figura 3.10). Os pellets confeccionados foram alocados na estufa ( $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) por 24h até atingir 0% de umidade para posterior realização dos ensaios. O PCS foi determinado calculando a média de dois ensaios válidos.



Figura 3.10. Fabricação de pellet para ensaio de determinação de poder calorífico

### 3.3.6 Densidade Energética

A densidade energética pode ser descrita como uma medida expressa pela quantidade de energia por unidade de volume de um combustível. Este conceito está relacionado com o poder calorífico e a densidade aparente do material que determina a quantidade de energia em joules que há em um metro cúbico.

A densidade energética foi calculada para a madeira sem torrefação e torrificada a 0% de umidade, conforme equação 5:

Eq. (5)

$$DE = PCS * DA$$

DE = Densidade energética expressa em MJ/m<sup>3</sup>;

PCS = poder calorífico superior expresso em MJ/kg na umidade “u”;

DA = Densidade aparente expressa em kg/m<sup>3</sup> na umidade “u”.

u = 0% de umidade

### 3.3.7 Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico representa a quantidade de massa que permanece na estrutura ao final do processo de torrefação, ou seja, a relação entre a massa seca de madeira torrificada e a massa de madeira seca (0% de umidade).

O rendimento gravimétrico foi calculado pela a razão entre a massa de madeira torrificada e a massa de madeira antes da torrefação, seca a 0% (equação 6), medidas por uma balança de precisão de 0,01 gramas, diferente do reator.

Eq. (6)

$$RG = \frac{M_{\text{torr}}}{M_{\text{seca}}} * 100$$

RG = Rendimento Gravimétrico em %

M torr = Massa de madeira seca (kg)

M seca = Massa em material torrificado (kg)

### 3.3.8 Rendimento Energético

O rendimento energético está relacionado com o rendimento gravimétrico e o PCS da madeira. Para o cálculo foi utilizada a equação 7 proposta por Bergman et.al (2004).

Eq. (7)

$$\eta_e = \eta_m \left\{ \frac{PCS_{\text{torr}}}{PCS_{\text{nat}}} \right\}$$

$\eta_e$  = Rendimento Energético

$\eta_m$  = Rendimento gravimétrico

$PCS_{\text{torr}}$  = PCS da madeira torrificada

$PCS_{\text{nat}}$  = PCS madeira in natura

## 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O arranjo estabelecido para esta pesquisa consistiu na combinação de 2 fatores: temperatura e acústica. Para cada tratamento foram confeccionados 10 corpos de provas, ou seja,

2 para cada repetição. No total foram realizados 50 ensaios de torrefação com a utilização de 100 corpos de prova para 2 temperaturas e 4 frequências sonoras, além da testemunha (sem acústica).

A casualização dos ensaios foi realizada por meio de sorteio e os corpos de prova escolhidos aleatoriamente respeitando a diferença máxima da densidade em  $0,5 \text{ g/cm}^3$  antes da secagem.

Os dados referentes aos parâmetros das propriedades energéticas foram tabulados em planilhas eletrônicas do software EXCEL 2016, sendo realizado cálculo de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Foram realizados ainda, testes iniciais que comprovaram a normalidade da distribuição dos dados (Shapiro-Wilk a 95% de probabilidade) e posteriormente foi feita a análise de variância (ANOVA), com auxílio do programa ASSISTAT 7.7, para verificar a existência de diferença estatística entre os parâmetros. Para os dados onde as amostras diferiram estatisticamente, foi aplicado o teste de médias de Tukey a 5% de significância.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no processo de torrefação e nas amostras torrificadas permitiram avaliar a eficiência e eficácia do processo, bem como os efeitos gerados em algumas propriedades da madeira (*Eucalyptus grandis*) torrificada submetidos aos efeitos da temperatura e da acústica. A seguir, os resultados são apresentados e discutidos simultaneamente, de acordo com a sequência dos ensaios realizados.

### 4.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA

A tabela 4.1 apresenta os valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. A densidade aparente média à 0% de umidade encontrada para a madeira foi de 0,78 g/cm<sup>3</sup>, inferior ao encontrado por Rodrigues e Rousset, (2009) de 0,85g/cm<sup>3</sup> que utilizou madeira de plantio de 31 anos de idade.

Tabela 4.1 Valores médios das propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira “in natura” de *Eucalyptus grandis*.

Biomassa	DA (g/cm <sup>3</sup> )	Compressão paralela		Análise imediata			Análise elementar				PCS (MJ/Kg)	DE (GJ/m <sup>3</sup> )
		Carga máxima média (kgf)	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	CF (%)	MV (%)	Cz(%)	C (%)	H (%)	N(%)	O (%)		
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,78	10874,16	1211,52	18,51	81,4	0,09	46,03	6,19	0,13	47,65	20,09	15,68
DP	0,03	343,4	218,83	0,22	0,23	0,01	*	*	*	*	*	*
CV	3,87	3,16	18,06	1,19	0,29	11,97	*	*	*	*	*	*

Em que: DA = Densidade Aparente; MOR= módulo de ruptura; CF = Carbono Fixo; MV = Material voláteis; Cz = Cinzas; C = Carbono; H = Hidrogênio, N = Nitrogênio; O = Oxigênio; PCS = Poder Calorífico Superior; DE = Densidade Energética; DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

\* Ensaio com amostras compostas.

Os valores referentes à compressão paralela as fibras e o módulo de ruptura da madeira, foram iguais a 10.874,16 kgf e 1.221,52 kgf/cm<sup>2</sup>. Estes resultados foram superiores aos 6.332,25 kgf e 782,98 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente, encontrados por Rodrigues (2009) que testou a resistência da madeira de *Eucalyptus grandis* com as dimensões das amostras de 2 x 4 x 8cm, seguindo parcialmente a norma ASTM D143/2000 com velocidade de aplicação de carga de 0,24mm/min. A diferença existente entre os trabalhos pode ser atribuída justamente a metodologia utilizada, dado que as dimensões da amostra estavam limitadas neste trabalho a 3 x 3 x 3 cm para obtenção do efeito acústico e a velocidade de 0,6 mm/min, conforme preconiza a norma ASTM D143/2000.

A análise química imediata para a madeira apresentou valores médios de 18,69% para o carbono fixo, 81,4% para materiais voláteis e 0,09% para cinzas, diferentes aos valores encontrados por Heidari et al. (2014) de 11,5%; 88,4%; 0,1% e Musinguzi et al. (2012) e 14,55%; 84,9%; 0,55% respectivamente, porém semelhantes aos valores de 19,56%; 80,15%; 0,29% e 19,6%; 80,40%; 1,6% obtidos por Rodrigues e Rousset (2009) e Ibrahim et al. (2013), respectivamente. A variação desses valores podem estar associados a localização, idade da árvore e a proporção entre celulose, hemicelulose e lignina (MORAIS, 2008).

Os valores obtidos referentes à análise elementar foram de 46,03% para carbono, 6,19% para hidrogênio, 0,13% para nitrogênio e 47,5% para oxigênio, este calculado por diferença. Estes valores estão próximos aos encontrados na literatura para a mesma espécie (HEIDARI et al., 2014; IBRAHIM et al., 2013; MUSINGUZI et al., 2012). O valor encontrado para o poder calorífico superior foi de 20,09 MJ/kg para a madeira de eucalipto, próximos aos 19,40 MJ/kg e 19,57MJ/kg encontrados por Ibrahim et al, (2013) e Rodrigues e Rousset (2009). Para a maioria das espécies florestais o valor do poder calorífico está próximo à 4.500 Kcal/kg ou 19 MJ/kg (QUIRINO et al., 2005).

A densidade energética é um bom parâmetro para avaliar a quantidade de energia existente em um determinado material, pois associa uma relação física (densidade aparente) com uma química (poder calorífico superior). Neste experimento, a densidade energética da biomassa apresentou o valor de 15,68 GJ/m<sup>3</sup>, inferior a 16,60 GJ/m<sup>3</sup> encontrado por Rodrigues e Rousset(2009). A diferença existente está relacionada ao valor da densidade aparente, uma vez que o poder calorífico superior, apesar de maior nesta pesquisa em relação ao de Rodrigues e Rousset, (2009), não foi determinante para obtenção de uma maior densidade energética do eucalipto.

## **4.2 PROCESSO DE TORREFAÇÃO**

### **4.2.1 Evolução da Temperatura**

A figura 4.1a apresenta a evolução da temperatura durante o processo de torrefação, medida pelo termopar posicionado dentro da amostra, submetidos ao patamar de 250°C. Verificou-se que todos os tratamentos sob o efeito acústico tiveram temperaturas máximas acima daquelas alcançadas pelo tratamento sem os efeitos de ondas sonoras. O incremento na temperatura foi da ordem de 2°C para os tratamentos sob efeito acústico em relação à testemunha durante o patamar de 60 minutos. Notou-se também, que os tratamentos com adição da acústica

atingiram o patamar de 250°C com aproximadamente 2 minutos e 30 segundos de antecedência ao da testemunha, com exceção da frequência 1810Hz.

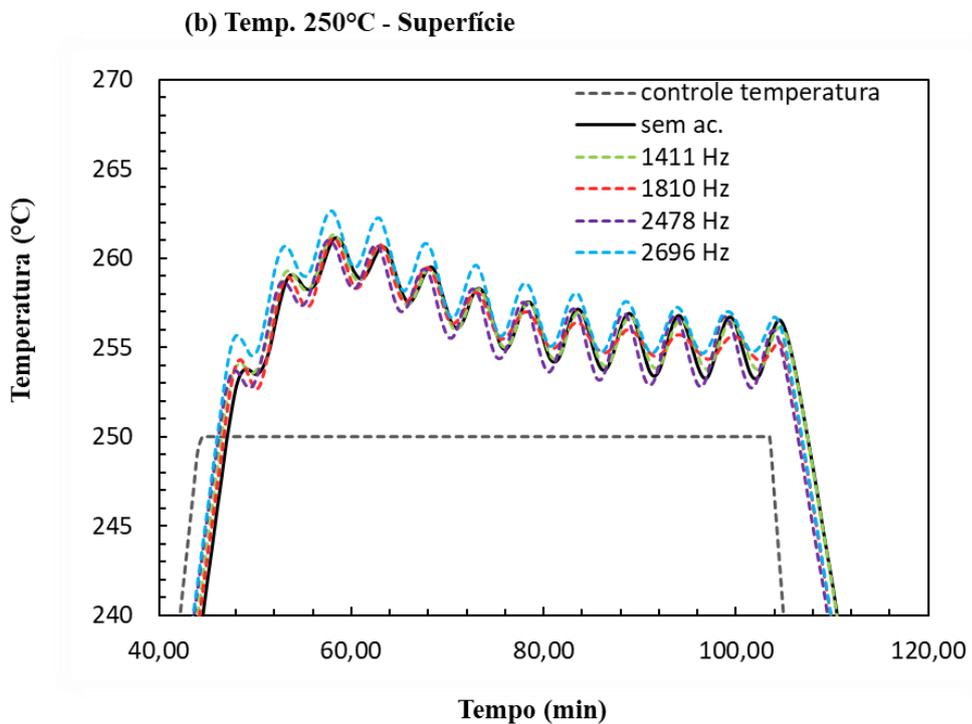
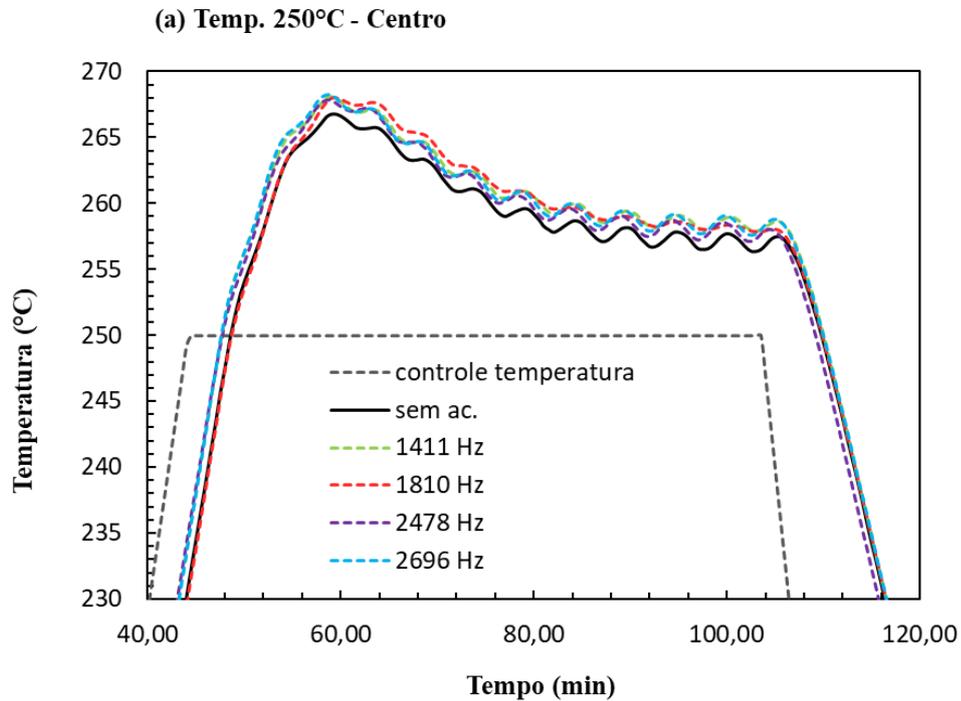


Figura 4.1 Temperaturas médias das repetições de cada tratamento no patamar de 250° C. A) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado no centro da amostras; B) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado na superfície da amostras.

As temperaturas medidas nos tratamentos sob influência da acústica pelo termopar localizado na superfície da madeira (figura 4.1b), se mantiveram próximos ao da testemunha, com exceção da frequência 2696 hz que apresentou maiores temperaturas médias e antecedência ao atingir o patamar.

Esses resultados mostraram que os perfis de temperatura para o centro e a superfície são diferentes sob influência acústica na condição de torrefação à 250°C. Isso demonstra que a transferência de calor e consequentemente a transferência de massa teve uma maior influência da onda acústica mais acentuada na posição central da amostra, em detrimento da superfície.

Como observado por Turner et al. (2010) e Rodrigues & Rousset (2009) as temperaturas médias medidas na superfície da madeira durante o processo de torrefação são maiores que no centro na fase de aquecimento, ocorrendo uma inversão quando se atinge o patamar de 250°C. Essa alteração de comportamento é devido às reações exotérmicas que acontecem dentro da madeira, aumentando a temperatura e consequentemente a produção de materiais voláteis (ROUSSET et al., 2004).

No auge das reações exotérmicas o tratamento submetido à frequência 2696 Hz atingiu um pico de temperatura de 268,5°C e a testemunha de 266,5°C. Esses valores diferem aos de Rodrigues & Rousset (2009), que encontraram picos máximos de 253,4°C para o mesmo patamar de temperatura, porém utilizando amostras de *Eucalyptus grandis* de 31 anos de idade, taxa de aquecimento de 3°C e dimensões diferentes das amostras (2 x 4 x 8cm) o que pode explicar as diferenças no resultado. Como demonstrado no trabalho de Rousset et al. (2004), a dimensão da amostra influencia na transferência de calor, de massa e na presença de reações exotérmicas no processo de torrefação.

A figura 4.2 também apresenta as temperaturas médias do centro e da superfície, com alteração apenas do fator temperatura, onde a programação foi alterada para o patamar de 270°C. Nessa temperatura os efeitos dos tratamentos sob influência acústica foram mais evidentes em relação ao tratamento sem uso de acústica.

Os perfis de temperatura do centro da amostra (figura 4.2a) indicou que todos os tratamentos atingiram o patamar de 270°C antes da testemunha, com destaque para as frequências 1411Hz, 2478Hz e 2696Hz com 3 minutos e trinta segundos aproximadamente de antecedência.

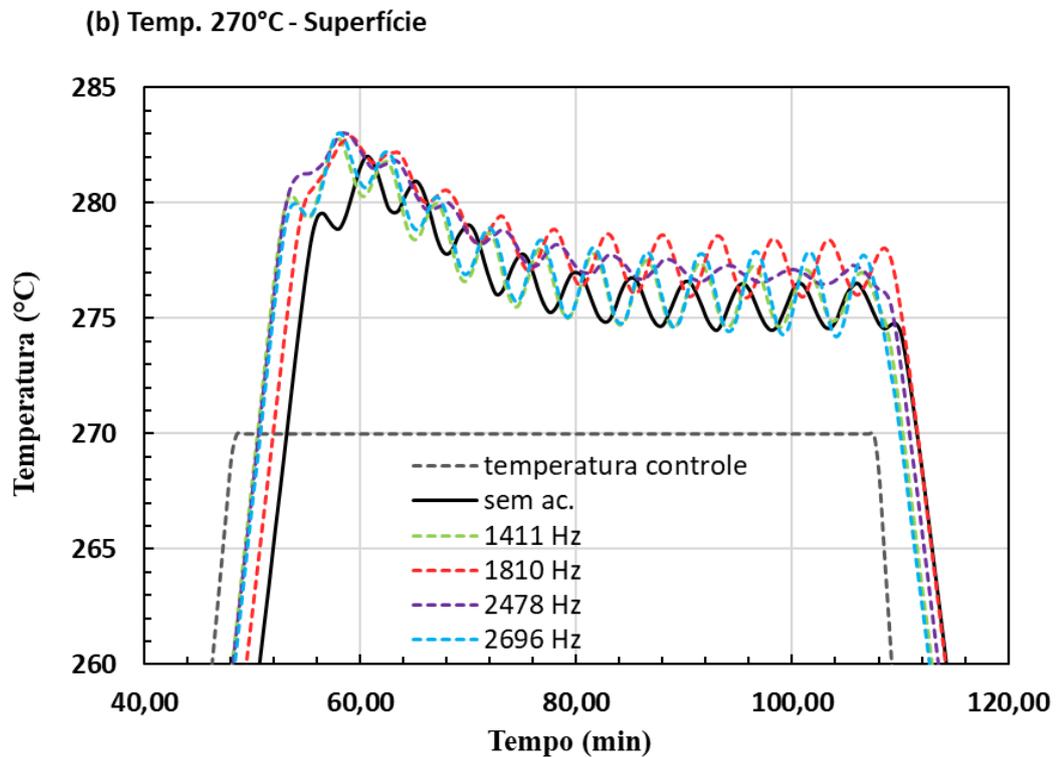
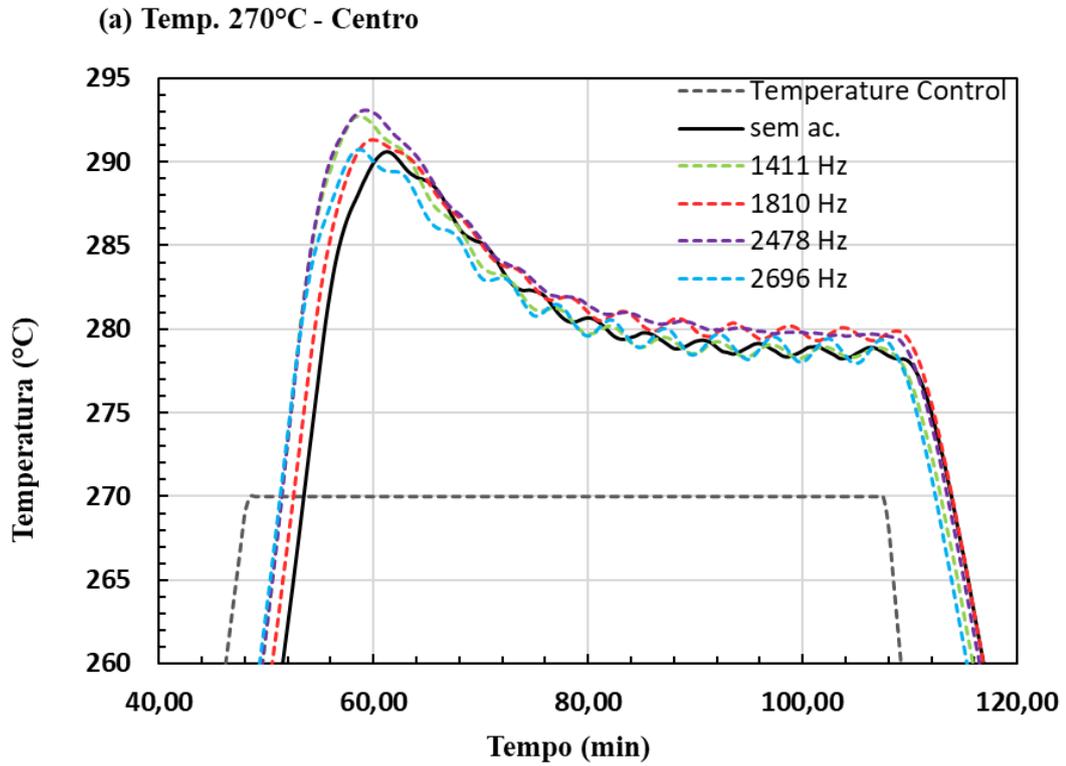


Figura 4.2 Temperaturas médias das repetições de cada tratamento no patamar de 270° C. A) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado no centro da amostras; B) Médias das temperaturas auferidas pelo termopar a cada 30 segundos localizado na superfície da amostras.

Em todos os tratamentos, o pico da reação exotérmica, que corresponde a temperatura máxima alcançada, ocorreram entre 58 até 62 minutos de ensaio, sendo que os tratamentos submetidos ao efeito da acústica alcançaram seus picos de temperatura antes da testemunha. Os tratamentos com as frequências 1411 e 2478Hz atingiram picos de 293,5°C e a testemunha de 290,5°C. Após o pico de temperatura ocasionado pelas reações exotérmicas (TURNER et al., 2010), as temperaturas de todos os tratamentos caíram e estabilizaram-se entre 279°C à 280°C durante o patamar de 270°C, não existindo diferenças expressivas entre os tratamentos.

Assim como ocorrido nas temperaturas medidas no centro da amostra, os tratamentos sob efeito acústico também atingiram o patamar de 270°C com antecedência em relação a testemunha e alcançaram picos de temperaturas mais altos, nas temperaturas medidas na superfície das amostras (figura 4.2b), com destaques para as frequências 1411, 1810 e 2696Hz e após esse período tenderam a se aproximar da testemunha.

Van Der Stelt et al. (2011) em pesquisas realizadas com madeira de faia nas temperaturas de 230, 250 e 280 °C e tempo de residência de 30 min verificaram que o processo de torrefação foi menos endotérmico ou mais exotérmico com aumento da temperatura de torrefação, o que pode explicar maiores evidências das reações exotérmicas e maior efeito da acústica em relação à testemunha na temperatura de 270°C.

Os resultados mostraram que o uso da acústica, na temperatura de 270°C, proporcionou maior transferência de calor na amostra durante o processo de torrefação ou melhora no processo de convecção, diminuindo o tempo para atingir o patamar desejado e propiciando maiores picos de temperatura na fase exotérmica. Estes resultados indicam a possibilidade de diminuição do gasto de energia na torrefação com o uso da acústica pela diminuição do tempo de residência.

#### **4.2.2 Evolução da Perda de massa**

A figura 4.3a apresenta a perda de massa em função do tempo para a temperatura de 250°C. A seta indicativa na parte superior aponta para o início da perda de massa nos tratamentos, onde é possível verificar que a degradação das biomassas sob efeito da acústica começa antes da testemunha. A perda de massa começa aproximadamente aos 30 minutos para as frequências 1411Hz e 1810Hz e aos 35 minutos para as frequências 2478Hz e 2696Hz. A degradação da biomassa da testemunha começa apenas aos 45 minutos de ensaio.

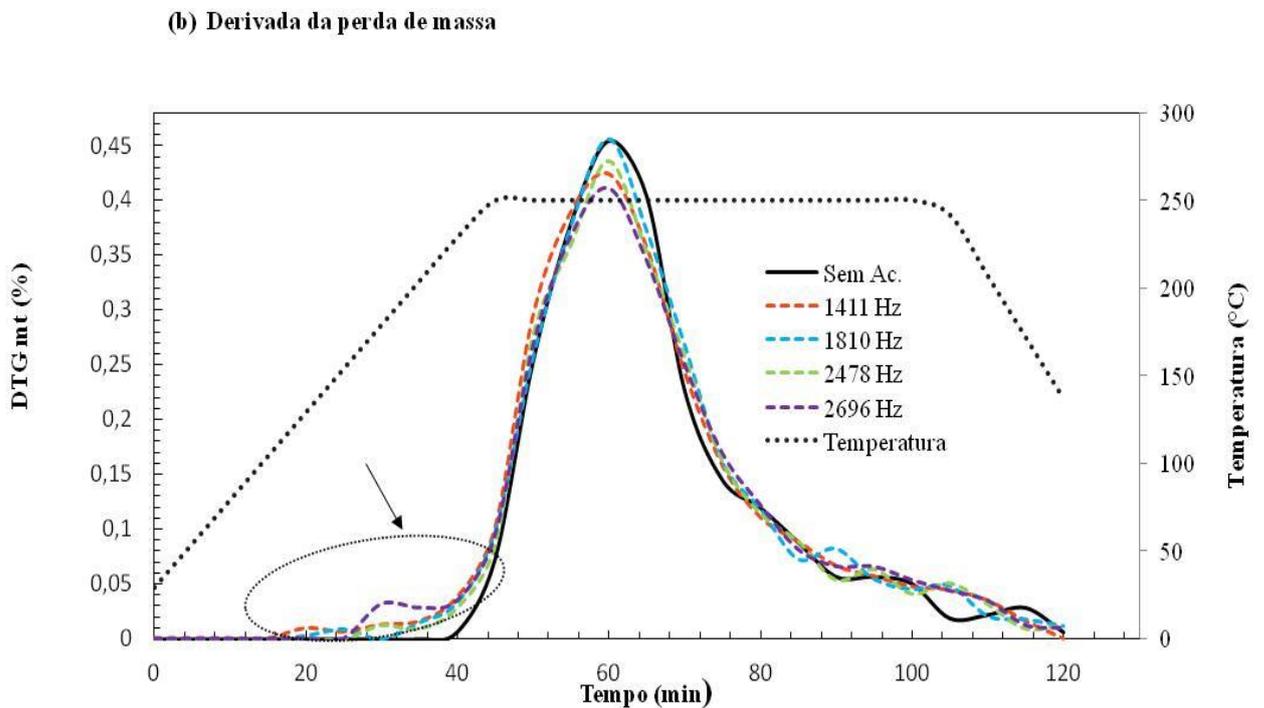
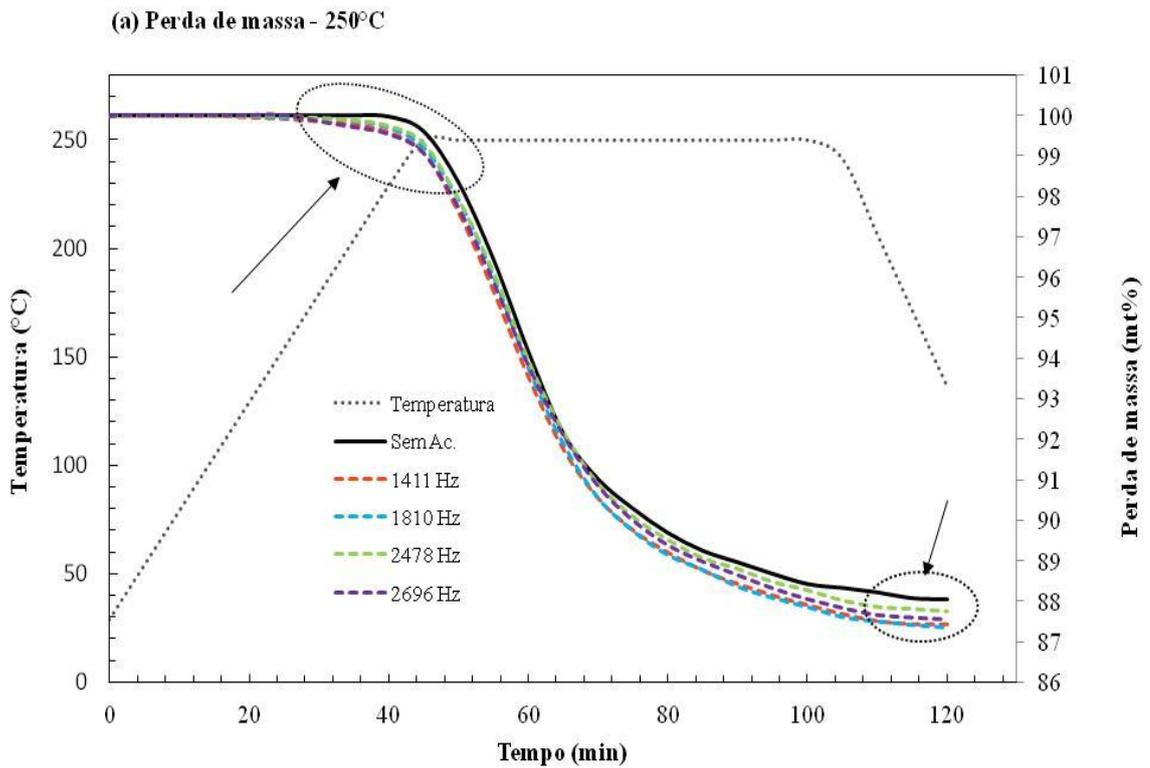


Figura 4.3 Perda de massa média das repetições de cada tratamento no patamar de 250°C. A) Médias das massas em relação ao tempo auferidas por balança de precisão a cada 30 segundos; B) Derivada da massa em relação ao tempo.

A seta indicativa na parte inferior da figura 4.3a aponta para a estabilização da degradação da biomassa assim que se inicia a rampa de decrescimento da temperatura. Nota-se que a perda de massa da testemunha é menor que os tratamentos sob efeito acústico.

A figura 4.3b mostra o perfil da taxa de perda de massa pela derivada dos valores em função do tempo. Nesta figura, pela indicação da seta, também foi possível verificar que os tratamentos sob efeito acústico tiveram início da degradação da biomassa antes da testemunha, porém na fase máxima de degradação, onde acontece a fase exotérmica, aproximadamente aos 60 minutos de ensaio, a testemunha apresentou uma taxa de degradação máxima superior aos tratamentos sob efeito acústico, com exceção da frequência 1810Hz.

Para a temperatura de 270°C foram observados comportamentos distintos para perda de massa em relação à temperatura de 250°C. A figura 4.4a mostra que a perda de massa teve início entre 20 e 25 minutos de ensaio para todos os tratamentos, com exceção da frequência 2478Hz que inicia no intervalo de 25 a 30 minutos. Dessa forma, não houve diferenciação entre os tratamentos sob efeito acústico e a testemunha no início do processo como observado para a temperatura de 250°C (figura 4.3a).

Após atingir o patamar de 270°C, os tratamentos sob efeito acústico diferiram da testemunha e apresentaram uma degradação de massa mais rápida e com maior intensidade até quase se igualarem ao término do processo (figura 4.4a). Portanto, assim como na evolução da temperatura à 270°C, o uso da acústica pode possibilitar a diminuição do tempo de residência.

Na figura 4.4b, a derivada da perda de massa indica que na temperatura de 270°C, os tratamentos sob efeito acústico apresentaram seus picos de degradação em função do tempo anterior ao da testemunha, o que corroborou com a figura 4.4a. Porém no auge da reação exotérmica, a testemunha apresentou uma taxa de degradação maior do que as frequências 1411Hz, 2478Hz e 2696Hz e menor que a frequência 1810Hz.

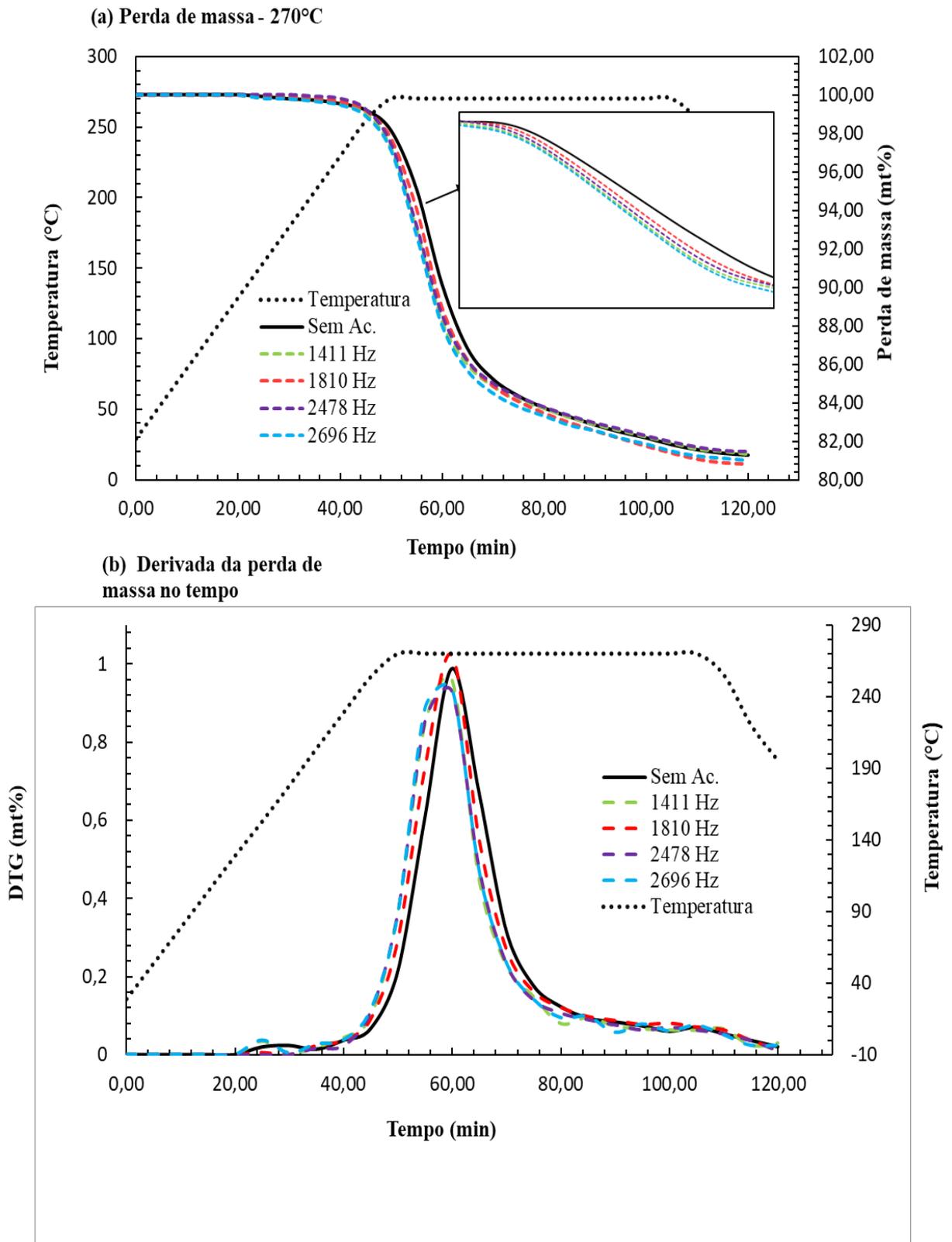


Figura 4.4 Perda de massa média das repetições de cada tratamento no patamar de 270°C. A) Médias das massas em relação ao tempo auferidas por balança de precisão a cada 30 segundos; B) Derivada da massa em relação ao tempo.

Segundo Almeida et al. (2010) o processo de torrefação é fortemente dependente da temperatura, tempo de residência e tipo de biomassa. O mesmo autor destaca ainda que a perda de massa é um dos indicadores da intensidade do processo de torrefação.

Nesse sentido, o efeito acústico não demonstrou grande capacidade de alterar a perda de massa em relação à testemunha durante o processo de torrefação, em contrapartida, promoveu o início precoce da degradação da biomassa, antecedência da fase exotérmica no processo e a chegada mais curta da temperatura ao patamar determinado.

Uma possível explicação para esses resultados é que o campo acústico produzido em torno da amostra de madeira atue como um catalizador, modificando as velocidades das partículas em torno da amostra da madeira e, conseqüentemente, a interação entre os voláteis resultantes produzidos pela degradação da madeira (condensável e não condensável). Desta forma, as transferências de calor podem ser melhoradas dentro da madeira devido a reações mais rápidas ou pelo aumento da transferência de calor por convecção, com a possibilidade de encurtamento do tempo de residência em relação aos processos normais de torrefação

### **4.3 PROPRIEDADES DO PRODUTO TORRIFICADO**

#### **4.3.1 Rendimento gravimétrico, densidade aparente e perda de massa**

A tabela 4.2 apresenta um resumo da análise de variância realizada para o rendimento gravimétrico e perda de densidade aparente para os fatores temperatura e acústica e a interação entre eles. Observou-se influência isolada altamente significativa da temperatura, tanto para o rendimento gravimétrico, quanto para a perda de densidade aparente, pois a medida que houve um aumento de temperatura, ocorreu uma maior redução de massa. Segundo Chen et al. (2015) isso ocorreu pela decomposição mais intensa da hemicelulose que ocorre na faixa de temperatura de 220°C a 315°C (CHEN et al., 2015).

Observou-se ainda nesta tabela que a acústica isolada ou a interação com a temperatura não influenciou significativamente o rendimento gravimétrico e a perda de densidade aparente, evidenciando que a utilização do efeito sonoro no reator não foi capaz de alterar significativamente a quantidade em massa de produto sólido torreficado.

Tabela 4.2 Resumo da análise de variância para o rendimento gravimétrico e perda de densidade aparente pós torrefação.

FV	GL	Rendimento gravimétrico (%)	Perda densidade aparente (%)
Temperatura	1	3205,0222**	814,6981**
Freq. Acústica	4	1,3224 ns	1,1399 ns
Temp x freq.	4	1,0182 ns	1,9282 ns
Resíduo	40		
CV		0,46	6,18

Em que: FV = Fator de variação; GL = grau de liberdade; CV = coeficiente de variação; \*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O coeficiente de variação para o rendimento gravimétrico foi baixo (0,46%), o que demonstrou uma homogeneidade dos tratamentos térmicos, a eficiência do reator de torrefação e um bom controle do experimento. Já o valor mais alto (6,18%) do coeficiente de variação para a perda de densidade aparente está associado às medições do volume pós torrefação, pois ao serem submetidas ao tratamento térmico, as amostras sofreram diferentes deformações nas suas faces, principalmente na temperatura de 270°C. Neste sentido, a medição manual do volume por meio do paquímetro digital, pode ter contribuído para esse valor.

A tabela 4.3 mostra os valores médios obtidos e a aplicação do teste de tukey para rendimento gravimétrico e perda percentual de densidade após a torrefação, considerando as temperaturas 250 e 270°C.

Tabela 4.3 Valores médios dos rendimentos gravimétricos e perda de densidade aparente da madeira de eucalipto submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas.

Tratamento	Rendimento Gravimétrico (%)		Perda densidade aparente (%)	
	250°C	270°C	250°C	270°C
T1 - Testemunha	88,06a (0,29)	81,29b (0,22)	6,45a (0,36)	10,62b (0,32)
T2 - freq 1411Hz	87,43a (0,18)	81,44b (0,57)	6,72a (0,32)	10,34b (0,70)
T3 - freq 1810 Hz	87,38a (0,18)	80,81b (0,57)	6,30a (0,32)	10,46b (0,82)
T4 - freq 2478 Hz	87,75a (0,29)	81,43b (0,77)	6,07a (0,25)	10,15b (0,76)
T5 - freq 2696 Hz	87,54a (0,30)	81,03b (0,18)	5,89a (0,32)	10,78b (0,57)

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma linha, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Os valores médios de 88,06% à 250°C e 81,29% a 270°C do rendimento gravimétrico encontrados para a testemunha foram diferentes aos rendimentos obtidos por Lu et al. (2012) numa torrefação de eucalipto tratados nas temperaturas de 250°C, 275°C e 300°C por uma hora, com rendimentos de 83,6%, 75,8% e 57,8%. Felfli et al. (2005) em estudos de torrefação de briquetes de madeira obtiveram rendimentos de 90%, 65% e 54% nas temperaturas de 220°C, 250°C e 270°C também por uma hora. Possivelmente, os maiores rendimentos gravimétricos encontrados neste trabalho estão associados às diferentes dimensões do sólido e menores taxas de aquecimento utilizadas no processo.

A porcentagem de perda de densidade apresentou para a testemunha valores de 6,45% e 10,62% para as temperaturas de 250°C e 270°C. Estes valores são semelhantes aos encontrados por Rodrigues e Rousset (2009) que obteve perdas percentuais de densidade de 7,06% e 14,12% para as temperaturas 250°C e 280°C no estudo de torrefação de *Eucalyptus grandis*.

Na tabela 4.4 e figura 4.5 são apresentadas comparações dos valores médios das porcentagens de perdas de massa no processo de torrefação encontrados nesse trabalho (testemunha) com de outros autores que estudaram a torrefação para a madeira de *Eucalyptus grandis*. Verificou-se que para a temperatura de 250°C houve uma semelhança nos resultados.

Tabela 4.4 Comparação dos valores médios da porcentagem da perda de massa no processo de torrefação da madeira *Eucalyptus grandis* do presente trabalho (testemunha) e da literatura.

Temperatura (°C)	Testemunha	Rodrigues e Rousset, 2009	Almeida et al, 2010	Rousset et al., 2012
220		3,61%	4,00%	
240				7,68%
250	11,94%	11,73%	12,50%	
270	18,71%			
280		19,85%	23,00%	20,21%

A partir da temperatura de 250°C, os valores médios da tabela 4.4 evidenciaram uma maior perda de massa com o aumento da temperatura, onde os valores praticamente dobraram em relação à temperatura de 250°C. O aumento da perda de massa sob a influência da temperatura foi discutida por Bergman et al. (2005) que observaram uma dependência do rendimento em massa com a temperatura da torrefação e mostraram que para temperaturas acima de 250°C o rendimento em massa da biomassa cai exponencialmente.

Na figura 4.5, observa-se que os valores encontrados pelos autores permanecem próximos a linha de tendência da testemunha, demonstrando similaridade dos efeitos da temperatura sobre a perda de massa na espécie *Eucalyptus grandis*.

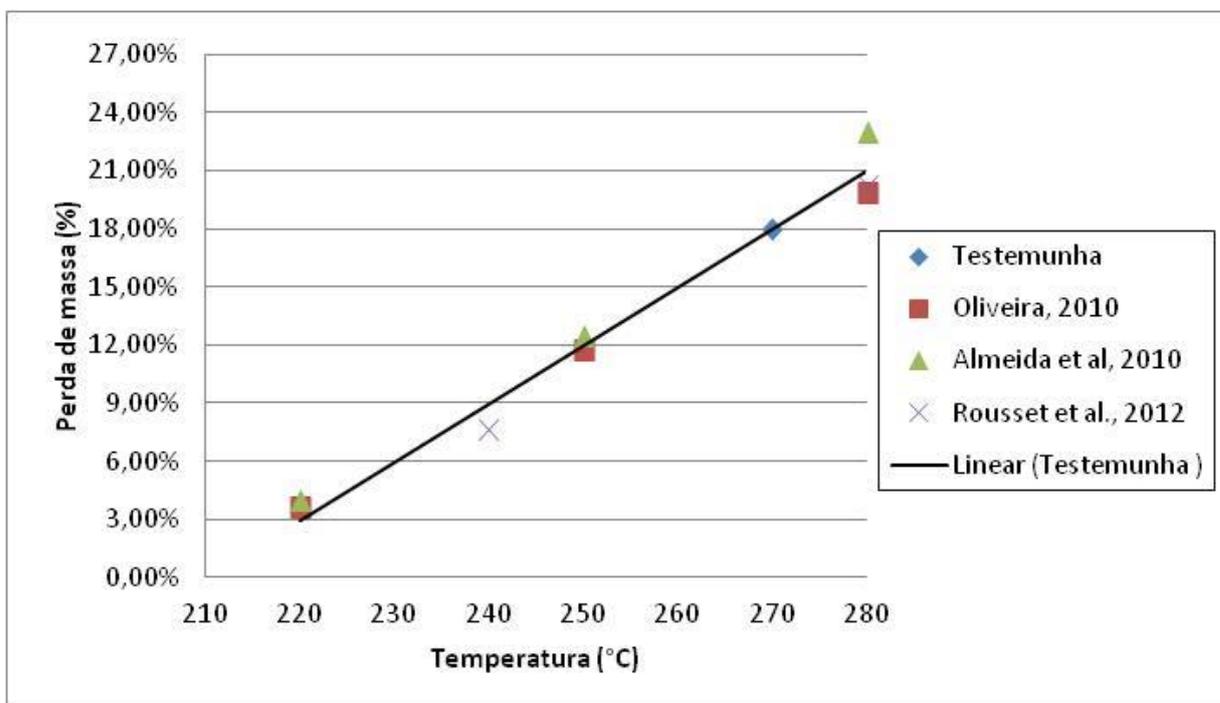


Figura 4.5 Comparativo do estudo de perda de massa em diferentes temperaturas no processo de torrefação para a madeira de *Eucalyptus grandis*.

Almeida et al. (2010) afirmam que a perda de massa no processo de torrefação é causada pela degradação dos componentes químicos da madeira, especialmente hemicelulose, resultando na produção de substâncias voláteis. Estes componentes são mais sensíveis à degradação térmica do que a celulose geralmente explicada pela falta de cristalinidade das hemiceluloses (WINDEISEN et al, 2007).

### 4.3.2 Compressão paralela às fibras

Com os dados do teste de compressão paralela às fibras foi possível calcular as resistências mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e compará-los, considerando os fatores temperatura e acústica, e indiretamente foi possível analisar a friabilidade após o processo de torrefação.

A tabela 4.5 mostra um resumo da análise de variância realizada para a carga máxima média e o módulo de ruptura (MOR) para as temperaturas 250°C e 270°C e frequências acústicas 1411, 1810, 2478 e 2696Hz. Houve influência significativa da temperatura, quando analisada

isoladamente e da interação entre temperatura e acústica, tanto para carga máxima média, quanto para o MOR. A mesma tabela apresenta influência significativa (teste F à 5% de probabilidade) para a interação da temperatura e frequência. Os coeficientes de variação foram baixos (11,54% e 11,13%) em se tratando de testes de resistência mecânica.

Tabela 4.5 Resumo da análise de variância para o carga máxima média e módulo de ruptura (MOR) pós torrefação.

FV	GL	Carga máxima média (kgf)	MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )
Temperatura	1	147,1315 **	61,5718 **
Freq. Acústica	4	2,1237 ns	2,3225 ns
Temp x freq.	4	3,4683 *	2,9106 *
Resíduo	40		
CV		11,54	11,13

Em que: FV = Fator de variação; GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação; \*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; \* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os resultados descritos na tabela 4.6 apontam para uma diminuição do módulo de ruptura (MOR) da madeira em função do aumento de temperatura e conseqüentemente uma perda de resistência mecânica e um aumento da friabilidade da madeira torrificada. A porcentagem de queda no MOR para a testemunha alcançou 27,4% na temperatura de 250°C e 50,27% na temperatura de 270°C em relação aos valores do MOR da biomassa “in natura” (figura 4.6).

Os resultados na temperatura de 250°C indicaram que todos os tratamentos sob efeito sonoro tiveram o MOR menor que o da testemunha, contudo apenas o tratamento sob a frequência 1810 Hz se diferenciou significativamente da testemunha pelo teste tukey a 5% de probabilidade. A mesma situação não ocorreu para a temperatura de 270°C, onde apenas o MOR dos tratamentos frequências 1411 e 2696 Hz foram inferiores ao da testemunha, porém sem diferenciação significativa.

Tabela 4.6. Valores médios da carga máxima média e Módulo de ruptura (MOR) da madeira de *Eucalyptus grandis* submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas.

Tratamento	Carga máxima média (kgf)		MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	250°C	270°C	250°C	270°C
T1-Testemunha	7689,32aA (841,07)	4440,98bA (378,26)	879,6aA (82,25)	602,47 bA (57,06)
T2-freq 1411Hz	6533,14aAB (1062,39)	4441,18bA (516,48)	753,16aAB (123,44)	596,24bA (63,43)
T3-freq 1810 Hz	6170,58aB (429,57)	5041,92bA (640,07)	705,81aB (48,36)	655,05aA (93,32)
T4-freq 2478 Hz	7132,04aAB (438,41)	4904,52bA (547,79)	822,58aAB (61,89)	661,31bA (71,60)
T5-freq 2696 Hz	6721,88aAB (850,00)	4103,86bA (543,64)	775,16aAB (92,43)	556,03bA (68,72)

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. As letras minúsculas comparam as médias entre linhas e as maiúsculas entre colunas. As médias com letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Em que: MOR = Módulo de ruptura.

Pela figura 4.6 foi possível verificar a porcentagem de perda de MOR em relação à biomassa “in natura” nos tratamentos com e sem acústica submetidos à duas temperaturas. Observou-se que o tratamento frequência 1810 Hz obteve maior perda de MOR (41,74%) em relação à testemunha (27,40%) na temperatura de 250°C, ou seja 14% superior, seguidos dos tratamentos frequências 2696 e 1411 Hz que tiveram uma perda de MOR quase 10% a mais em relação a testemunha na temperatura de 250°C.

Na temperatura de 270°C a diferença de perda de MOR da testemunha para os tratamentos sob efeito acústico não foi expressiva como na temperatura de 250°C e nos casos dos tratamentos frequências 1810 e 2478 Hz foram inclusive menores que a testemunha. O tratamento frequência 2696 Hz com 54,14% de perda de MOR obteve maior diferença percentual em relação à 50,27% da testemunha em 270°C.

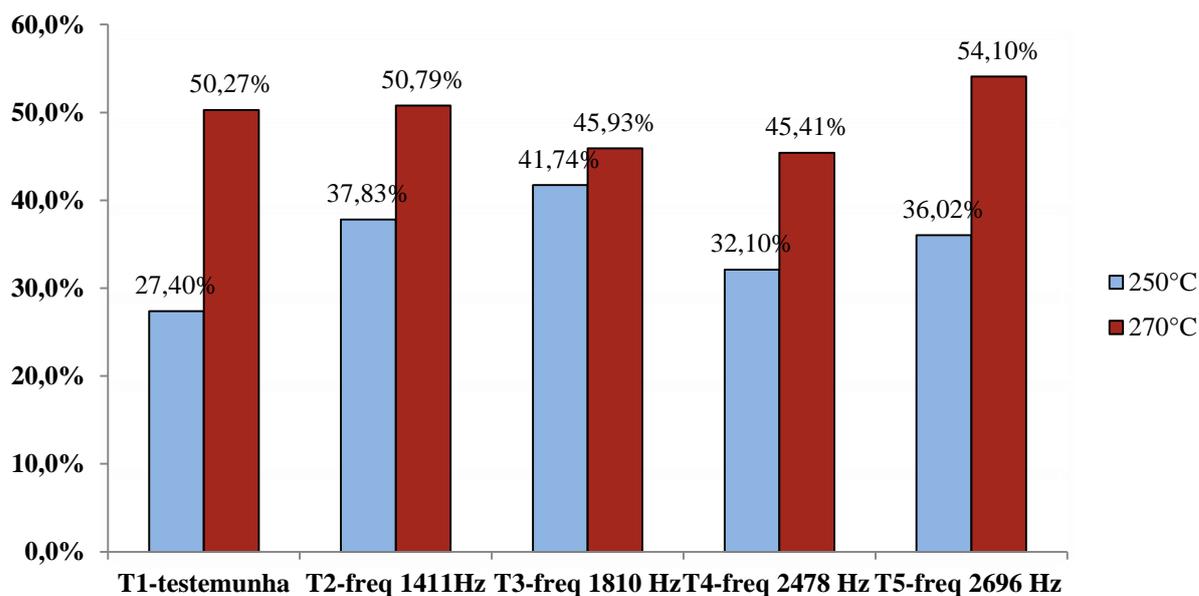


Figura 4.6 Porcentagem de perda de MOR em relação à biomassa in natura.

Rodrigues e Rousset (2009), em estudos de torrefação realizados com diferentes temperaturas da madeira de *Eucalyptus grandis* encontraram valores de perda de MOR de 15,19%, 40,47% e 62,79% para temperaturas de 220°C, 250°C e 280°C, respectivamente.

Severo e Tomaselli (2000), em estudos realizados com a madeira de *Eucalyptus dunni* concluíram que os módulos de elasticidade para a compressão paralela as fibras não eram alteradas pelos tratamentos térmicos, enquanto que a resistência à compressão paralela às fibras diminuiu significativamente com aumento de temperatura.

Calonego et al. (2012) relatam que o aquecimento da madeira em altas temperaturas causa a degradação nas hemiceluloses e na região amorfa da celulose, o que contribui para aumento do grau de cristalinidade da celulose e mudanças relevantes nas propriedades mecânicas da madeira.

Arias et al. (2008) observaram que a perda de resistência mecânica da biomassa por meio da torrefação, proporciona um aumento da friabilidade com a destruição parcial das fibras, tornando o sólido torrificado mais friável e quebradiço.

Chen et al. (2015) descrevem que após a biomassa ser torrificada, uma porção de hemicelulose é removida e as paredes celulares na biomassa são destruídas. Essas mudanças na microestrutura possibilita uma melhor moagem da biomassa.

Phanphanich e Mani (2011) em estudos realizados com amostras de pinheiro verificaram que a energia específica necessária para moagem da biomassa torrificada diminui significativamente com o aumento da temperatura, podendo chegar a 90% menor em relação a madeira in natura.

Os resultados, como descritos por diversos autores, apontam para uma perda de resistência mecânica com o aumento da temperatura no processo de torrefação, tornando o produto mais friável, quebradiço e em melhores condições para moagem do que a biomassa in natura.

A utilização de ondas sonoras na frequência 1810 Hz, na temperatura de 250°C possibilitou uma diminuição na resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus grandis* e com isto uma maior friabilidade, melhorando as condições de moagem. Contudo, verificou-se que todos os tratamentos sob efeito acústico tiveram maiores perdas de MOR em relação a testemunha na temperatura de 250°C em valores absolutos. Assim como em outras propriedades já observadas, as ondas acústicas podem proporcionar uma maior transferência de calor durante o processo de torrefação, causando uma maior degradação na parte química da madeira e conseqüentemente uma maior perda de resistência mecânica, mesmo que pequena em termos de valor absoluto e não significativo estatisticamente.

#### **4.3.3 Análise Imediata**

A análise química imediata dos sólidos torrificadas teve por objetivo avaliar a quantidade de materiais voláteis (MV), teor de cinzas (Cz) e de carbono fixo (CF) no fator temperatura e frequência acústica. Assim, foi possível verificar se esses dois fatores contribuíram para a elevação do CF e diminuição do MV, características desejáveis na conversão energética da biomassa.

A tabela 4.7 apresenta um resumo da análise de variância realizada para o material volátil, cinzas e carbono fixo considerando as temperaturas de 250°C e 270°C e as frequências acústicas 1411Hz, 1810Hz, 2478Hz e 2696Hz. Para todas as variáveis analisadas, a influência da temperatura, quando analisada isoladamente, foi altamente significativa enquanto que o fator acústico quando analisado isoladamente, foi significativo apenas para o teor de cinzas. Não houve interação significativa entre a temperatura e a frequência para as variáveis estudadas. Os coeficientes de variação foram baixos para MV e CF o que demonstrou a alta precisão do

experimento. Para o teor de cinzas o coeficiente de variação foi mais elevado, devido aos valores muito baixos e de difícil precisão desse elemento na espécie da madeira estudada.

Tabela 4.7 Resumo da análise de variância para a análise química imediata pós torrefação.

FV	GL	MV (%)	Cz (%)	CF (%)
Temperatura	1	373,7846 **	46,2378 **	350,1240 **
Freq. Acústica	4	1,7138 ns	3,0921 *	1,6629 ns
Temp x freq.	4	1,0352 ns	1,7479 ns	1,0048 ns
Resíduo	40			
CV		1,42	19,50	4,06

Em que: FV = Fator de variação; GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação; MV = Materiais Voláteis; Cz = Cinzas; CF = Carbono Fixo; \*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; \* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ns = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A tabela 4.8 mostra os valores médios da composição química imediata do sólido torreficado nos dois fatores estudados para as duas temperaturas e respectivos teste de Tukey. Os resultados ressaltaram uma diminuição relevante dos materiais voláteis, um aumento significativo do carbono fixo e um leve aumento no teor de cinzas com a elevação da temperatura de 250°C para 270°C, com diferença significativa para todos os tratamentos.

Tabela 4.8 Valores médios da composição química imediata da madeira de *Eucalyptus grandis* submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas.

Tratamento	MV (%)		Cz (%)		CF (%)	
	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C
T1-Testemunha	77,17a (0,60)	71,12b (0,83)	0,054a (0,006)	0,086b (0,001)	22,77a (0,61)	28,79b (0,83)
T2-freq 1411Hz	76,69a (0,50)	71,21b (1,49)	0,067a (0,029)	0,094b (0,021)	23,24a (0,52)	28,70b (1,51)
T3-freq 1810 Hz	76,59a (1,23)	71,89b (0,75)	0,059a (0,015)	0,095b (0,011)	23,35a (1,23)	28,02b (0,75)
T4-freq 2478 Hz	77,40a (0,45)	71,14b (1,49)	0,082a (0,007)	0,093b (0,006)	22,52a (0,45)	28,77b (1,49)
T5-freq 2696 Hz	76,37a (0,62)	70,07b (1,63)	0,069a (0,023)	0,116b (0,011)	23,56a (0,63)	29,81b (1,63)

Os valores entre parênteses são referentes ao desvio padrão. Valores assinalados com letras diferentes para as médias, dentro da mesma linha, diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey

Em que: MV = Materiais Voláteis; Cz = Cinzas; CF = Carbono Fixo

O componente teor de cinzas mostrou-se pouco relevante nesse estudo, pois não chegou a 0,12% da composição química imediata em todos os tratamentos, mesmo na temperatura mais alta estudada (270°C). LU et al. (2012), em estudos de torrefação com e sem a adição de nitrogênio, encontram valores próximos a 0% de Cz nas temperaturas de 250 e 275°C. Segundo Mckendry (2002), a quantidade baixa de cinzas possui um caráter positivo, uma vez que quantidades elevadas de Cz afetam tanto os custos de manuseio da biomassa quanto seu processo de conversão, além de estarem relacionadas a menor quantidade de energia do combustível com à maior presença Cz.

O teor de material volátil da testemunha caiu de 81,4% da madeira in natura (tabela 4.1) para 77,17% na temperatura de 250 °C e 71,12% na de 270 °C. O carbono fixo apresentou um aumento de 18,51% da madeira “in natura” (tabela 4.1) para 22,77% e 28,79% na temperatura de 250°C e 270°C respectivamente.

Apesar de não ter existido diferença significativa, todos os tratamentos sob efeito acústico na temperatura de 250°C tiveram suas porcentagens maiores para o CF do que a testemunha, com exceção de 22,52% para CF da frequência 2478Hz. O tratamento sob efeito sonoro frequência 2696Hz, apresentou os melhores resultados energéticos para composição química imediata com 76,37% e 23,56% para MV e CF à 250°C e 70,07% e 29,81% à 270°C. Esses valores apontaram para uma diferença maior que 1% em relação à testemunha para CF a 270°C. A figura 4.7 ilustra os resultados apresentados da tabela 4.8.

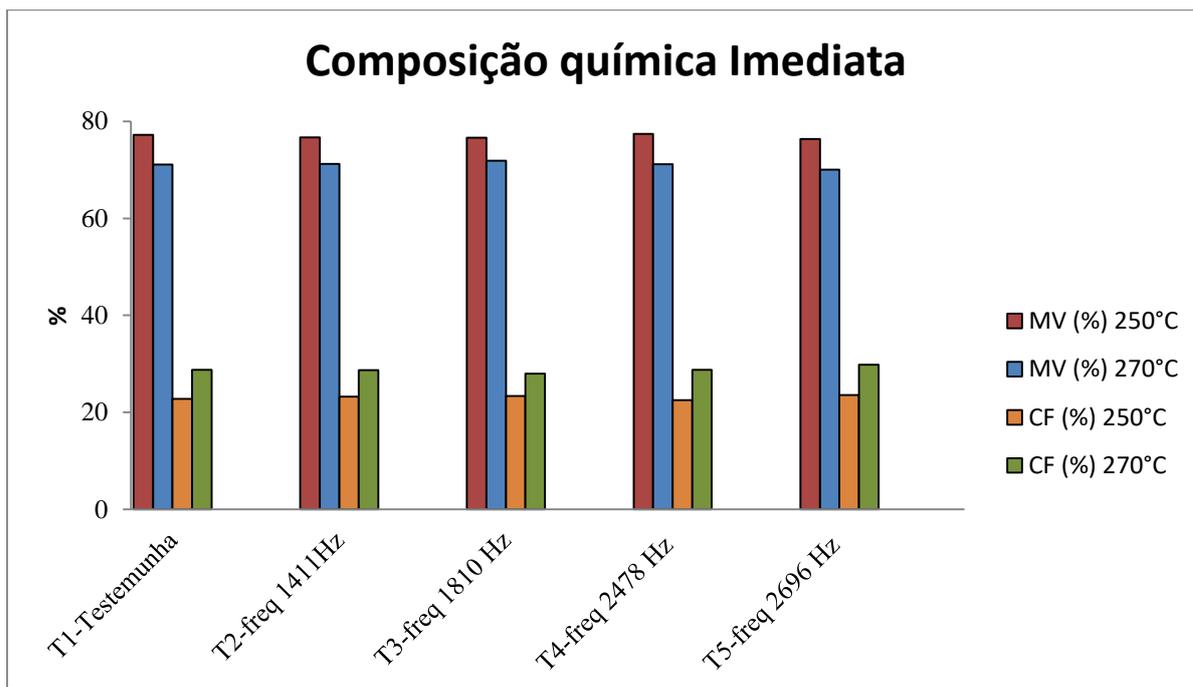


Figura 4.7 Porcentagem de Materiais Voláteis e Carbono Fixo presente na madeira de *Eucalyptus grandis* após torrefação sob dois fatores: temperatura e Frequência acústica.

Rousset et al. (2011) em estudos realizados com torrefação de *Bambusa vulgaris* encontraram valores para MV e CF de 68,63% e 29,06% a 250°C e 58,91% e 37,65% a 280°C. Já Almeida et al. (2010), obtiveram resultados de MV e CF de 72,5% e 27,2 a 250°C e 67,1 e 32,8% a 270°C em torrefações de *Eucalyptus saligna* por uma hora. Felfli et al. (2005) em pesquisas realizadas com briquetes encontraram teores de MV e CF de 65% e 27% a 250°C e 52,1 % e 38,2% a 270°C. Peng et al. (2013) no estudo sobre densidade, dureza e absorção de umidade de pellets de madeira torrificados obteve resultados de MV e CF de 84,5% e 15,3% a 240°C e 73,72% e 26,0 a 270°C.

Os estudos citados acima, assim como o do presente trabalho, evidenciaram um aumento do CF e uma diminuição do MV com o aumento da temperatura no processo de torrefação. Almeida et al. (2010) citaram que o tempo de residência também contribui para a elevação de CF e diminuição MV nesse processo. Nesse contexto, o efeito acústico pode possibilitar uma diminuição do tempo de residência com a obtenção do mesmo teor de carbono fixo do processo tradicional.

Assis et al. (1982), citado por Almeida et al (2010), destacaram que uma elevação no carbono fixo foi altamente adequada para uso na produção de energia, dando como exemplo, o fato de que o aumento de 16% em carbono fixo resultou em uma diminuição de 4,3 kg de carbono

requerido por tonelada de ferro gusa, no uso industrial de carvão de madeira. Por sua vez, Rousset et al. (2011) relataram que o produto torreficado com maior teor de carbono fixo produziu maior calor na combustão.

Na tabela 4.9 são apresentados os resultados encontrados para o CF (testemunha) em comparação com a outros estudos de torrefação submetidos a várias temperaturas para a madeira de Eucalipto.

Tabela 4.9 Comparação de valores da porcentagem de Carbono fixo do presente trabalho com estudos de torrefação realizados com a madeira de Eucalipto na literatura.

Temperatura (°C)	Testemunha	Rodrigues e Rousset, 2009.	Almeida et al, 2010.	Rousset et al, 2012.	Aires et al, 2008.	Lu et al, 2012.
Madeira “in natura”	18,51%	19,56%	16,20%		15,30%	
220		20,56%	22,30%			
240				22,44%	24,50%	
250	22,77%	24,65%	28,30%			24,70%
260					30,40%	
270	28,79%					28,75% (275°C)
280		30,06%	32,30%	26,80%	36,90%	

É possível verificar divergências nas principais comparações dos resultados como no valor de CF da biomassa, ou mesmo na torrefação à 250°C. Este fato pode estar relacionado a variáveis como idade das espécies, quantidade de lignina, celulose e hemicelulose não abordadas neste trabalho, diferentes usos de taxa de aquecimento ou ainda nas diversas dimensões do material, uma vez que foram utilizados diferentes formas ou mesmo diversas granulometrias dos corpos de prova nos trabalhos assinalados na tabela 4.9. Rodrigues (2009) destacou que as dimensões das amostras podem interferir no processo de transferência de calor e consequentemente na saída dos materiais voláteis do material e na porcentagem de carbono fixo.

#### 4.3.4 Análise elementar

O progresso da torrefação também foi monitorado pela análise elementar dos sólidos torreficados e teve por objetivo avaliar a quantidade de Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O) nas amostras sob efeito da temperatura e da acústica. As razões atômicas O/C e H/C também foram determinadas. Dessa forma, foi possível observar os efeitos da temperatura

e da acústica nas porcentagens desses elementos, como a diminuição dos teores de oxigênio e hidrogênio e o aumento do teor de carbono, bem como a diminuição das razões atômicas O/C e H/C em relação à biomassa.

A tabela 4.10 apresenta os valores para a composição química elementar dos tratamentos considerando as temperaturas 250°C e 270°C e frequências acústicas 1411, 1810, 2478 e 2696 Hz. Os dados referentes à testemunha apresentaram um aumento da porcentagem de carbono de 52,27% para 54,89% e uma redução do teor hidrogênio de 5,61 para 5,38% e do oxigênio de 41,85% para 39,48% com a elevação da temperatura de 250°C para 270°C para os sólidos torreficados. A razão atômica de O/C e H/C também diminuiu com o incremento do fator temperatura.

Tabela 4.10 Valores da composição química elementar da madeira de *Eucalyptus grandis* submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas.

Tratamento	C (%)		H (%)		N (%)		O (%)		Relação O/C		Relação H/C	
	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C
T1-Testemunha	52,27	54,89	5,61	5,38	0,27	0,25	41,85	39,48	0,601	0,540	1,279	1,168
T2-freq 1411Hz	52,47	55,05	5,56	5,39	0,26	0,29	41,71	39,27	0,597	0,536	1,263	1,167
T3-freq 1810 Hz	52,47	54,84	5,56	5,50	0,24	0,27	41,73	39,39	0,597	0,539	1,263	1,195
T4-freq 2478 Hz	52,48	54,77	5,46	5,40	0,27	0,27	41,79	39,56	0,598	0,542	1,240	1,175
T5-freq 2696 Hz	53,16	54,99	5,43	5,30	0,25	0,25	41,16	39,46	0,581	0,539	1,217	1,148

Em que: C = Carbono; H = Hidrogênio; N = Nitrogênio; O = Oxigênio

Arias et al. 2008 encontraram valores de 53% para carbono, 5,9% para hidrogênio e 40,9% para oxigênio na temperatura de 240°C e 63,5% para carbono, 5,3% para hidrogênio e 30,9% para oxigênio na temperatura de 280°C em torrefações de Eucalipto. Já Lu et al. 2012 observaram valores de 57,8%, 4,9% e 37,0% na temperatura de 250°C e 59,7%, 4,7% e 35,4% na temperatura de 275°C para carbono, hidrogênio e oxigênio respectivamente, também em estudos de torrefação de eucalipto. Chen et al. (2015), após análise de vários estudos de torrefação de diferentes biomassas e temperaturas, concluíram que as razões atômicas O/C e H/C são diminuídas para os intervalos de 0,1-0,7 e 0,7-1,6, respectivamente no processo de torrefação.

Os valores observados na análise elementar da testemunha foram inferiores em comparação aos citados pelos autores e, como na análise imediata, podem estar ligadas a variáveis como idade das espécies, quantidade de lignina, celulose e hemicelulose não abordadas neste trabalho ou nas diferentes dimensões do material e taxas de aquecimento usadas nos trabalhos.

A acústica não influenciou a composição química elementar e as razões O/C e H/C de forma impactante. No entanto, todos os tratamentos submetidos ao efeito da acústica tiveram valores superiores para a porcentagem de C e inferiores ao de O e H na temperatura de 250°C. O mesmo fato não foi observado na temperatura de 270°C, onde apenas os tratamentos com as frequências 1411 e 2696 Hz se sobressaíram em relação à testemunha. A testemunha também apresentou razões O/C e H/C maiores em relação aos tratamentos sob efeito acústico na temperatura de 250°C o que denota para uma maior degradação e melhor padrão energético para os tratamentos com acústica. Na temperatura de 270°C, apenas os tratamentos nas frequências 1411 e 2696 Hz apresentaram razões O/C e H/C menores ao valor da testemunha.

A aplicação da frequência 2696 Hz na madeira de *Eucalyptus grandis* na temperatura de 250°C, destacou-se com uma diferença percentual maior de 0,89% para carbono, e menor de 0,69% e 0,18% para oxigênio e hidrogênio respectivamente em relação à testemunha. Para a temperatura 270°C, apenas as frequências 1411 e 2696 Hz mostraram-se porcentagens superiores à testemunha com 0,16% e 0,10% de diferença sobre o elemento carbono e as frequências 1411, 1810 e 2696 Hz que apresentaram diferenças percentuais menores de 0,21%, 0,09% e 0,02% sobre o oxigênio, respectivamente sobre a testemunha.

A figura 4.8 apresenta as perdas e ganhos em porcentagem de oxigênio e carbono respectivamente, considerando a temperatura e a acústica em relação aos valores da biomassa “in natura”. As frequências 1411 e 2696 Hz apresentaram melhores qualidades energéticas com perdas de 5,94% e 6,49% no teor de oxigênio e ganhos de 6,44% e 7,13% de teor carbono na temperatura de 250°C, respectivamente. Na temperatura de 270°C as mesmas frequências apresentaram perdas de 8,38% e 8,19% de oxigênio e ganhos de 9,02% e 8,96% de carbono, respectivamente.

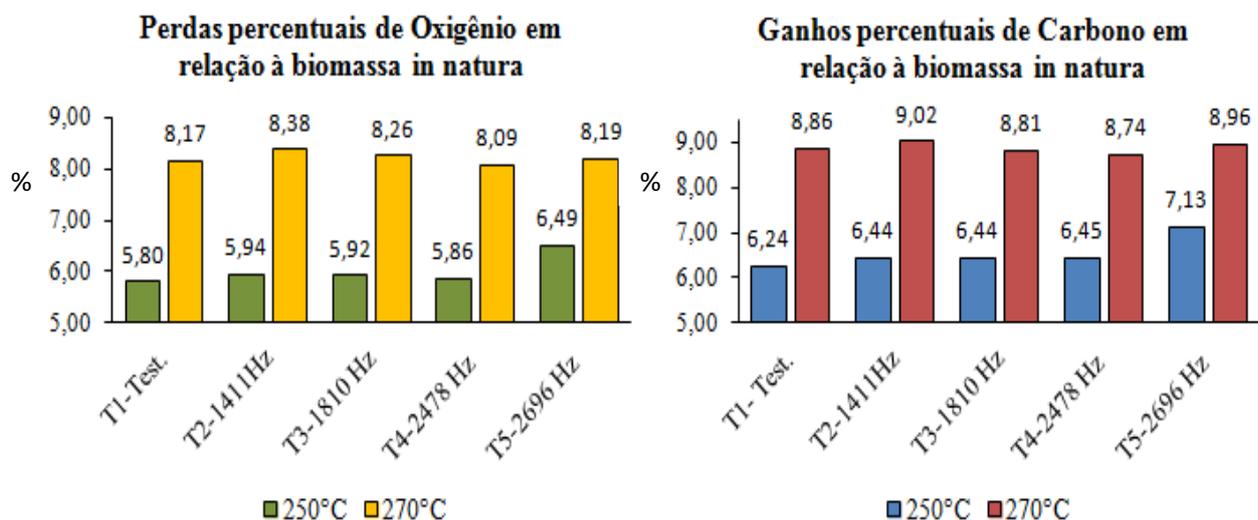


Figura 4.8 Percentuais de perdas e ganhos em Oxigênio e Carbono das amostras torrificadas em relação à biomassa “in natura” de *Eucalyptus grandis*.

Chen et al. (2015) concluíram que após a torrefação, a umidade e os voláteis leves, que contêm mais hidrogênio e oxigênio, são removidos da biomassa, enquanto ocorre maior retenção de carbono. Os mesmos autores relatam a importância da concentração do carbono, uma das principais fontes de calor, juntamente com o hidrogênio, que são liberadas na combustão de um combustível. Ao contrário, uma maior porcentagem de oxigênio e cinzas reduz o poder calorífico da biomassa.

Segundo Prins et al. 2006 e Deng et al. 2009 os principais produtos da degradação torrefação dos gases não condensáveis são monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), enquanto que os principais componentes em voláteis condensáveis incluem água (H<sub>2</sub>O) e ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) e em menor proporção o metanol (CH<sub>3</sub>OH), ácido fórmico (CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), ácido láctico (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>), furfural (C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>), hidroxil acetona e vestígios de fenol. Isso implica que durante a torrefação há maior liberação em forma de gases das moléculas de hidrogênio e oxigênio do que o carbono, consequentemente, conforme demonstrado nos resultados, as amostras torrificadas apresentaram maiores teores de carbono após o processo de torrefação do que a biomassa “in natura”. O incremento da temperatura, de 250 para 270°C e da acústica na maioria dos tratamentos também contribuíram para o aumento dos teores de carbono nas biomassas torrificadas.

Os resultados da análise elementar demonstraram que os tratamentos sob efeito acústico apresentaram maior degradação da madeira do que a testemunha, com maiores porcentagens de carbono e menores de oxigênio, hidrogênio e razões O/C e H/C, salvo algumas exceções. Sob

esse aspecto, os tratamentos com as frequências 1411 e 2696 Hz se mostraram promissores, uma vez que, como observado em outras análises, apresentaram as melhores características energéticas na análise elementar do sólido torreficado em relação à testemunha, tanto nas temperaturas de 250°C quanto na de 270°C.

#### 4.3.5 Poder Calorífico Superior, Densidade Energética e Rendimento Energético.

Os dados do poder calorífico superior (PCS) são apresentados na tabela 4.11. Verificou-se um aumento do PCS de 21,33 MJ/Kg para 22,29 MJ/Kg e da densidade energética (DE) de 14,95 GJ/m<sup>3</sup> para 15,80 GJ/m<sup>3</sup> para a testemunha em função do aumento da temperatura de torrefação de 250°C para 270°C.

Tabela 4.11 Valores do Poder calorífico superior, densidade Energética e rendimento energético da madeira de *Eucalyptus grandis* submetidos ao processo de torrefação sob duas temperaturas e diferentes frequências acústicas.

Tratamento	PCS (MJ/kg)		DE (GJ/m <sup>3</sup> )		ηe (%)	
	250°C	270°C	250°C	270°C	250°C	270°C
T1-Testemunha	21,33	22,29	14,95	15,80	93,13	90,09
T2-freq 1411Hz	21,62	22,40	15,24	15,89	94,02	90,64
T3-freq 1810 Hz	21,58	22,16	15,62	15,03	93,79	89,61
T4-freq 2478 Hz	21,57	22,33	15,25	16,00	94,11	90,65
T5-freq 2696 Hz	21,53	22,43	15,58	15,96	93,86	90,45

Em que: PCS = Poder calorífico superior; DE= Densidade Energética; ηe = Rendimento energético.

Os valores do PCS da testemunha foram semelhantes com os valores de 21,44MJ/kg à 250°C e 22,65KJ/Kg à 280°C obtidos por Rodrigues e Rousset (2009) em estudo de torrefação de *Eucalyptus grandis*, porém maiores que os 20,60 MJ/Kg à 250°C e 21,5MJ/Kg à 275°C encontrados por LU et al. (2012) em estudos de torrefação e carbonização de eucalipto em atmosferas oxidativas. Para outros trabalhos, foram encontrados valores superiores ao da testemunha como os obtidos por Rousset et al. (2012) de 21,07 MJ/kg à 240°C e 23,40 MJ/kg à 280°C em estudos de torrefação de *Eucalyptus grandis* em atmosferas submetidos à diferentes concentrações de oxigênio e Arias et al. (2008) com 21,8MJ/kg à 240°C e 22,8MJ/kg à 260°C em estudos da influência da torrefação na moagem e reatividade de *Eucalyptus sp.*

Chew e Doshi (2011) ao estudarem os avanços nas tecnologias da torrefação verificaram que o aumento da temperatura e o tempo de residência ocasionaram um maior valor do PCS.

Chen et al. (2015) ao realizarem estudo sobre o estado da arte da torrefação da biomassa, revelaram que os principais objetivos da torrefação são o aumento do poder calorífico e da densidade energética da biomassa.

Sob essa perspectiva houve um incremento do PCS em razão do aumento da temperatura, sendo que todos os tratamentos sob efeito de ondas sonoras apresentaram valores superiores ao da testemunha na temperatura de 250°C, com destaque para a frequência 1411Hz com 21,61 MJ/kg, ou seja, 0,29 MJ/kg superior à testemunha. Na temperatura de 270°C, apenas o PCS da frequência 1810 Hz foi inferior ao da testemunha, com destaque para os valores de 22,43MJ/kg e 22,40 MJ/kg das frequências 1411 e 2696 Hz respectivamente.

A figura 4.9 apresenta uma comparação dos ganhos em porcentagem de PCS e carbono fixo para temperatura e acústica em relação aos valores da biomassa “in natura”. Nessa figura foi possível verificar um maior incremento no PCS dos tratamentos sob efeito acústico em relação à testemunha, principalmente na temperatura de 250°C.

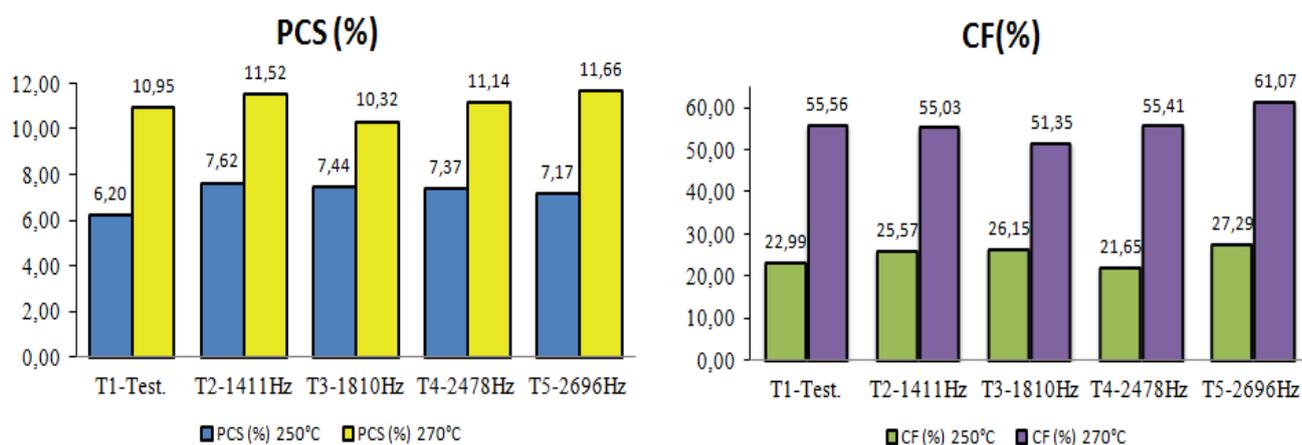


Figura 4.9 Média dos ganhos percentuais em Poder Calorífico Superior e Carbono Fixo das amostras torrificadas em relação à biomassa in natura de *Eucalyptus grandis*.

Rodrigues (2009) observou ganhos de 9,56% e 15,75% no PCS na temperatura 250°C e 280°C, respectivamente em relação a biomassa “in natura” na torrefação de *Eucalyptus grandis*. Esses valores foram maiores ao encontrado nesse estudo e podem estar relacionados as diferentes taxas de aquecimento da torrefação e idades das espécies estudadas.

Normalmente o maior PCS está associado ao maior ganho percentual de carbono fixo. Nesse contexto, de acordo com a Figura 4.9, os tratamentos que tiveram maiores PCS tiveram maiores percentuais em carbono fixo, com exceção da frequência 2478 Hz na temperatura de 250°C.

Os resultados da DE (tabela 4.11) demonstraram que todos os tratamentos sob efeito sonoro foram superiores ao da testemunha nas temperaturas de 250°C e 270°C, com exceção ao da frequência 1810 Hz na temperatura 270°C, que apresentou resultado bem abaixo dos demais tratamentos.

A torrefação na temperatura de 250°C e patamar de 60 minutos não foi capaz de melhorar a DE em relação a biomassa “in natura” (15,68 GJ/m<sup>3</sup>), mesmo nos tratamentos nos quais foram incluídos o efeito acústico. Tal fato contrapõe os resultados obtidos por Rodrigues e Rousset (2009), que observaram melhores resultados de DE (16,92 GJ/m<sup>3</sup>) na temperatura de torrefação de 250°C e com ganho percentual de 2,19% em relação a biomassa in natura. Para a temperatura de 270°C todos os tratamentos apresentaram resultados da DE superiores ao da biomassa in natura com exceção para a frequência 1810 Hz.

O comportamento da DE na frequência 1810 Hz, bem como as diferenças entre esse estudo e a literatura, podem ser explicadas pelas médias das densidades aparentes das amostras in natura utilizadas na torrefação. Mesmo com um bom controle das densidades na seleção das amostras e a realização da casualização dos tratamentos para realização dos ensaios, as amostras utilizadas em cada tratamento apresentaram médias diferentes, que por fim influenciaram diretamente nos resultados da DE.

A tabela 4.12 apresenta as médias das densidades aparente das amostras utilizadas antes e depois da torrefação em cada tratamento. Verificou-se que a média da densidade aparente da biomassa “in natura” na frequência 1810 Hz na temperatura de 270°C foi inferior as demais, chegando a ser menor 0,05g/cm<sup>3</sup> em relação aos outros tratamentos na mesma temperatura. A baixa densidade do tratamento T3 também foi verificada após a torrefação.

Tabela 4.12 Médias das densidades aparentes das madeiras antes e após a torrefação.

Tratamento	Média DA in natura (g/cm <sup>3</sup> )		Média DA pós torrefação (g/cm <sup>3</sup> )	
	250°C	270°C	250°C	270°C
T1-Testemunha	0,76	0,80	0,71	0,71
T2-freq 1411Hz	0,76	0,80	0,71	0,71
T3-freq 1810 Hz	0,78	0,76	0,72	0,68
T4-freq 2478 Hz	0,76	0,81	0,71	0,72
T5-freq 2696 Hz	0,78	0,81	0,72	0,71
Biomassa in natura	0,78g/cm <sup>3</sup>			

Em que: DA= Densidade aparente

Portanto, a baixa densidade na frequência 1810 Hz na temperatura de 270°C provocou uma baixa densidade energética, sendo inferior inclusive aos tratamentos sob a temperatura de 250°C. Notou-se ainda que esse mesmo tratamento apresentou menor PCS em relação as outras frequências na temperatura de 270°C (tabela 4.11). Nesse sentido, verificou-se uma maior relevância da densidade aparente (0% de umidade) no valor da densidade energética em relação ao PCS.

Contudo, como observado por Rodrigues (2009), a umidade da madeira normalmente se encontra na faixa de 15% quando utilizada para fins energéticos, o que acarreta em um menor poder calorífico e conseqüentemente uma densidade energética muito abaixo às analisadas pós torrefação.

Uma das maneiras de evidenciar a qualidade e eficiência da torrefação pode ser verificada pela quantidade de energia concentrada na biomassa mesmo após passar por tratamento térmico. Na temperatura de 250°C, os tratamentos com e sem efeito acústico apresentaram perdas de massa em torno de 12%, porém mantiveram uma média de 94% de conteúdo energético. Já na temperatura mais severa (270°C), os tratamentos mantiveram uma média de 90% dos conteúdos energéticos, no entanto perderam quase 19% da sua massa original (tabela 4.11).

Os resultados mostram uma boa qualidade da torrefação e estão de acordo aos 90% de rendimento energético na temperatura de 250°C proposto por Bergman et al, (2005) e Prins et al (2006a), aos de 92,7% encontrados por Bridgeman et al. (2008) na torrefação de salgueiro à

250°C por 30 minutos e aos 93,7% e 88,5% encontrados por LU et al. (2012) para eucalipto nas temperaturas de torrefação de 250°C e 275°C respectivamente.

O rendimento energético apresentou padrões de resultados semelhantes ao PCS e DE no fator efeito acústico, uma vez que, os tratamentos sob efeito sonoro apresentaram valores superiores ao da testemunha com exceção da frequência 1810 Hz na temperatura de 270°C.

Assim como observado nas análises anteriores, as frequências 1411 e 2696 Hz também apresentaram resultados superiores no PCS, na DE e no rendimento energético em relação à testemunha nas duas temperaturas estudadas. Desse modo, esses tratamentos mantiveram uma superioridade dos resultados nas análises do sólido torreficado em relação à testemunha, fato não observado para as frequências 1810 e 2478 Hz.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A adição de ondas acústicas no processo de torrefação proporcionou nos perfis de temperatura e perda de massa, menores tempos para atingir o patamar programado, maiores picos de temperaturas máximas na fase exotérmica do processo e antecipação das reações de degradação, evidenciando um encurtamento do tempo de residência com menor gasto de energia no processo.

A elevação da temperatura de 250°C para 270°C foi suficiente para alterar significativamente as propriedades analisadas no processo de torrefação. O efeito acústico não alterou significativamente essas propriedades, em contrapartida, apresentou maiores valores absolutos nas propriedades analisadas em relação à testemunha na temperatura de 250°C e na maioria dos casos na temperatura de 270°C. Os tratamentos com as frequências 1411 e 2696 Hz foram aquelas que apresentaram melhores valores absolutos em relação à testemunha e se mostram promissoras para realização de novos estudos de tratamentos térmicos.

Por se tratar de um estudo pioneiro existem várias possibilidades para potenciais novos experimentos. Portanto, recomenda-se para as próximas pesquisas, a determinação da porcentagem presente de holocelulose, lignina e extrativos nas biomassas tratadas termicamente com efeito acústico. Outras combinações de temperaturas e tempo de residência, bem como, novas condições de atmosferas e utilização de outras espécies com diferentes densidades ou utilizar celulose ou hemicelulose isoladas na torrefação com acústica. Há ainda, necessidade de um maior rigor no controle das densidades da biomassa a serem utilizadas para melhor evidência do efeito acústico. Para tanto, deve-se selecionar o intervalo da densidade das amostras apenas após a secagem completa das biomassas.

Por fim, um aperfeiçoamento do reator é desejado, como melhorar a sensibilidade do controle da temperatura em tempo real, equipando o reator com termopares mais sensíveis, aperfeiçoar a regulação do fluxo do nitrogênio para evitar oscilações nos dados das perdas de massa da balança, melhorar o sistema de vedação, realizar nova caracterização do reator para selecionar outras opções de frequências sonoras, ou ainda, construir e utilizar um reator menor e cilíndrico para promover um maior efeito acústico no processo de torrefação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão Vegetal - Análise Imediata**. Brasília: NBR 8112, 1986a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico**. Brasília: NBR 8633, 1986b.

ACHARYA, B.; SULE, I.; DUTTA, A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 2, n. 4, p. 349–369, 2012.

ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9778–9784, 2010.

ARIAS, B. et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. West Conshohochon: ASTM D143, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel**. West Conshohochon: ASTM E777, 2008a.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Nitrogen in Refuse-Derived Fuel Analysis Samples**. West Conshohochon: ASTM E778, 2008b.

BATES, R. B.; GHONIEM, A. F. Biomass torrefaction: Modeling of volatile and solid product evolution kinetics. **Bioresource Technology**, v. 124, p. 460–469, 2012.

BATIDZIRAI, B. et al. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. **Energy**, v. 62, p. 196–214, 2013.

BENNETT, G. J. et al. Heat Transfer Enhancement in Ducts Due to Acoustic Excitation. **7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT-7)**, n. July, p. 2009, 2009.

BERGMAN, P. et al. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. **2nd World conference and technology exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate**

**Protection**, v. a, p. 78–82, 2005a.

BERGMAN, P. C. A et al. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. **Energy research Centre of the Netherlands ECN ECNC05013**, n. July, p. 71, 2005b.

BERGMAN, P. C. A.; KIEL, J. H. A. Torrefaction for biomass upgrading. **Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France**, n. October, p. 17–21, 2005.

BRIDGEMAN, T. G. et al. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**, v. 87, n. 6, p. 844–856, 2008.

BRITO, J. .; BARRICHELO, L. E. . **Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia**. piracicaba: IPEF, 1979.

CALONEGO, F. W. et al. Tipos de Ruptura em Madeira de Eucalyptus grandis Modificada Termicamente. **Silva Lusitana**, v. 153, p. 153–161, 2013.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; BALLARIN, A. W. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from E. grandis. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 4, p. 453–460, 2012.

CARNEIRO, J. A. M.; TORRES, E. A.; ALVES, C. T. **Análise técnica de sistemas de torrefação para aproveitamento da biomassa na geração de energia**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...**2014

CHEN, W. H.; KUO, P. C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 803–811, 2011.

CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847–866, 2015.

CHEW, J. J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011.

CIOLKOSZ, D.; WALLACE, R. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 3, p. 317–329, maio 2011.

COELHO, J. . **Biomassa, biocombustíveis, bioenergia**. Brasília: MME – Ministério das Minas e Energia, 1982.

- COPANT - COMISSIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. **Maderas: Método de determinación del peso específico aparente**. La Paz: COPANT 461, 1972.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008.
- COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e suas barreiras à sua penetração no mercado. In: Rio de Janeiro: Bndes setorial, 2005. p. 5–30.
- COSTA, E. C. DA. **Acústica Técnica**. 1ª edição ed. São Paulo: editora Blucher, 2003.
- COUTO, L. C. et al. Vias de valorização Energética. **Biomassa e energia**, v. 1, p. 71–92, 2004.
- COUTO, L.; FONSECA, E. M. B.; MÜLLER, M. D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: Aspectos Técnicos, Econômicos Sociais e Ambientais**. Belo Horizonte: Cemig, 2000.
- COUTO, L.; MULLER, M. D.; TSUKAMOTO FILHO, A. A. Florestas Plantadas para Energia: Aspectos Técnicos, sócio-econômicos e ambientais. **UFV, Departamento de Engenharia Florestal**, 2001.
- DENG, J. et al. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 86, n. 2, p. 331–337, 2009.
- DI BLASI, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 47–90, 2008.
- DOAT, J. **Research into wood pyrolysis**. Symposium Forest Products Research International Archivement and the Future, 1985
- FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (Mimosa scabrella, benth) e aspectos gerais da combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981.
- FELFLI, FÉLIX E. FONSECA, LUENGO, CARLOS A. SOLER, P. B. **Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas**. Campinas: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2000
- FELFLI, F. F. et al. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, v. 9, n. 3, p. 19–22, 2005.
- GOULART, M. et al. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis*

sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, v. 13, p. 167–175, 2003.

GUEDES, C. L. B. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. In: São Paulo: Química Nova, 2010. p. 781–786.

HANBY, V. . Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor. **Journal of Engineer Power**, v. 91, p. 48–52, 1969.

HEIDARI, A. et al. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of Eucalyptus grandis in fluidized bed reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 2594–2602, 2014.

HUANG, Y. F. et al. Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum. **Bioresource Technology**, v. 123, p. 1–7, 2012.

IBRAHIM, R. H. H. et al. Physicochemical characterisation of torrefied biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 103, p. 21–30, 2013.

KOMAROV, S.; HIRASAWA, M. Enhancement of gas phase heat transfer by acoustic field application. **Ultrasonics**, v. 41, n. 4, p. 289–293, 2003.

LACAVAL, P. TEIXEIRA et al. **EFEITO DA FREQUÊNCIA E DA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NO FORMATO DE CHAMAS PRÉ-MISTURADAS PULSADAS**. Águas de Lindóia: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999

LAZZARINI, V. E. P. **Elementos de Acústica**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 1988.

LIBBY, P. A.; WILLIAMS, F. A. Turbulent Reacting Flows. **Academic Press**, 1994.

LU, K. M. et al. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, v. 123, p. 98–105, 2012.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. PIRÓLISE E TORREFAÇÃO DE BIOMASSA. In: **Biomassa para Energia**. 1 edição ed. Campinas: Editora Unicamp, 2008. p. 1–27.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technol**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MEDEIROS, E. B. **Introdução à teoria acústica**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA - MME. **Balanco Energético Nacional 2017 - Ano base 2016**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da Idade Da Madeira de Eucalipto na sua Química e Polpabilidade , e Branqueabilidade e propriedade físicas da polpa**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2008.

MUSINGUZI, W. B. et al. Thermal characterization of Uganda's *Acacia hockii*, *Combretum molle*, *Eucalyptus grandis* and *Terminalia glaucescens* for gasification. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 402–408, 2012.

NOGUEIRA, L. A. H. et al. **Dendrologia: Fundamentos e Aplicações**. Brasília: Aneel, 2000.

OLIVEIRA, F. L.; LACAVALA, P. T.; BARRETA, L. G. **Deteção de fuligem em chamas pulsadas**. São José dos Campos: II Escola de combustão, 2009

OLIVEIRA, T. K. et al. Produtividade de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) Stapf cv. Marandu sob diferentes arranjos estruturais de sistema agrossilvipastoril com eucalipto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 3, p. 748–757, 2007.

PACHECO, F. Energias Renováveis: Breves Conceitos, Conjuntura e Planejamento. In: Salvador: SEI, 2006. p. 4–11.

PENG, J. et al. Development of torrefaction kinetics for British Columbia softwoods. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 10, n. 1, 2012.

PENG, J. H. et al. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 2, p. 967–974, 2013.

PEREIRA, B. C. S. P. CARNEIRO, A. C. O. et al. **Effects of spacing in the proprieties of the wood and charcoal of eucalyptus clones from energetic forests**. Buenos Aires: Forests in Development a Vital Balance, 2009

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.

PÉREZ, S. et al. Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain). **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 11, p. 4657–4664, nov. 2011.

- PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1246–1253, 2011.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, n. 1, p. 35–40, 2006a.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, n. 1, p. 28–34, 2006b.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. More efficient biomass gasification via torrefaction. **Energy**, v. 31, n. 15, p. 3458–3470, 2006c.
- PROTÁSIO, T. D. P. et al. Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435, 31 dez. 2015.
- QUIRINO, W. F. et al. Poder Calorífico Da Madeira E De Materiais Ligno-Celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100–106, 2005.
- RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2009.
- RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P. L. A. Effects of torrefaction on energy properties of Eucalyptus grandis wood. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 446–452, 2009.
- ROUSSET, P. et al. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 8225–8231, 2011.
- ROUSSET, P. et al. Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 96, p. 86–91, 2012.
- ROUSSET, P. et al. Change in particle size distribution of Torrefied biomass during cold fluidization. **Energy**, v. 51, p. 71–77, 2013.
- ROUSSET, P.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (P. robusta) by a thermal treatment at high temperature. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 62, n. 2, p. 113–119, 2004.
- ROWELL, R. M.; PETERSSEN, R.; HAN, J. S. Cell Wall Chemistry. In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: Boca Raton, 2005. p. 35–74.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2008.

SCHORR, C.; MUINONEN, M.; NURMINEN, F. **Torrefaction of biomass.** Finland: Miktech Ltd/Centre of Expertise-programme, 2012.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Florestas do Brasil em resumo - 2013: dados de 2007-2012.** Brasília: SFB, 2013.

SILVA, F. DE A. S.; AZEVEDO, C. A. . **The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data** Afr. J. Agric. Res., , 2016.

SILVEIRA, E. A. et al. Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. **Jornaul of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2017.

SINGH, R. et al. Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass. **Renewable Energy**, v. 98, p. 226–237, 2016.

TRAN, K. Q. et al. Stump torrefaction for bioenergy application. **Applied Energy**, v. 112, n. January 2005, p. 539–546, 2013.

TUMULURU, J. S. et al. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. **Industrial Biotechnology**, v. 7, n. 5, p. 384–401, 2011.

TURNER, I. et al. An experimental and theoretical investigation of the thermal treatment of wood (*Fagus sylvatica* L.) in the range 200-260 °C. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 4, p. 715–725, 2010.

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciencia Florestal**, v. 20, n. 1, p. 137–146, 2010.

VAN DER STELT, M. J. C. et al. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: O Brasil no contexto mundial. **Quimica Nova**, v. 32, n. 3, p. 757–767, 2009.

WANNAPEERA, J.; FUNGTAMMASAN, B.; WORASUWANNARAK, N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass.

**Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 92, n. 1, p. 99–105, 2011.

WINDEISEN, E.; STROBEL, C.; WEGENER, G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 523–536, 2007.

ZALESNY, R. S. et al. Woody biomass from short rotation energy crops. In: ZHU, J. Y.; ZHANG, X.; PAN, X. J. (Eds.). . **Sustainable Productions of Fuels, Chemicals and Fibers from Forest Biomass**. Washington DC: American Chemical Society, 2011. p. 27–63.

ZINN, B. T. 6. pulse combustion applications: past, present and future. In: **Unsteady Combustion**. Springer, Dordrecht: [s.n.]. v. 306p. 113–137.