

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
NÍVEL MESTRADO**

**GUILHERME IGOR DIAS**

**EFEITO DA TORREFAÇÃO DE RESÍDUOS DE *Eucalyptus grandis***

**São Leopoldo/RS**

**2021**

GUILHERME IGOR DIAS

**EFEITO DA TORREFAÇÃO DE RESÍDUOS DE *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo/RS

2021

D541e Dias, Guilherme Igor.  
Efeito da torrefação de resíduos de *Eucalyptus grandis*  
/ Guilherme Igor Dias. – 2021.  
81 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica, 2021.

“Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander.”

1. Biomassa. 2. Tratamento térmico. 3. *Eucalyptus*  
*grandis*. I. Título.

CDU 621.7

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

### **AGRADECIMENTOS À CAPES**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A torrefação é um processo térmico que ocorre na fase endotérmica da pirólise com temperaturas entre 200°C e 300°C. O crescente estudo do processo está relacionado com a conversão de matérias-primas lignocelulósicas em um produto “carbonizado” com capacidade de ser inserido como combustível para usinas de energia, gaseificadores, unidades de combustão etc. O objetivo do presente estudo foi verificar as modificações produzidas na biomassa oriunda de *Eucalyptus grandis* quando submetida ao processo de torrefação. Foram aplicadas três temperaturas de torrefação (200 °C, 250°C e 300°C) com três tempos de residência (20 min, 30 min e 40 min), e a biomassa torrificada foi analisada quanto ao seu Rendimento Gravimétrico, Rendimento Energético e Poder Calorífico Superior. Foi feita a determinação da variação em densidade energética, melhoria da moagem e ângulos de repouso e deslizamento dos materiais torreficados, sempre em comparação com a amostra *in natura*. Foi observado que a temperatura do processo de torrefação é o fator mais impactante na modificação das estruturas físico-químicas da biomassa, com a temperatura de 300 °C sendo a que propiciou melhorias mais significativas ao material. O maior PCS obtido foi para a torrefação realizada a 300 °C, apresentando um aumento de 12,23% quando comparado com a biomassa *in natura*. O aumento da temperatura gera um material de menor granulometria e mais friável, facilitando as operações de moagem, com a torrefação realizada a 300 °C produzindo um material de diâmetro 25% menor quando comparado com a amostra *in natura*. Após a moagem, essa biomassa torrificada a 300 °C apresentou um diâmetro 39,33% menor quando comparado com a mesma amostra torrificada e 54,24% menor quando comparado com a amostra *in natura* não moída. Em relação a densidade energética, o aumento da massa específica aparente propiciou que ocorresse um ganho de 24,85% e 28,25% para a massa específica aparente e de leito. O ângulo de repouso diminuiu em função do aumento da temperatura, com o ângulo de deslizamento apresentando o comportamento inverso. A torrefação mostrou-se como um pré-tratamento capaz de agregar valor energético ao material, além de melhorar suas características físicas tornando um combustível mais apropriado para inserção em sistemas de geração energética.

**Palavras-chave:** biomassa; tratamento térmico; *Eucalyptus grandis*.

## ABSTRACT

Torrefaction is a thermal process that occurs in the endothermic phase of pyrolysis at temperatures between 200°C and 300°C. The growing study of the process is related to the conversion of lignocellulosic raw materials into a “carbonized” product with the capacity to be inserted as fuel for power plants, gasifiers, combustion units, etc. The aim of this study was to verify the changes produced in the biomass from *Eucalyptus grandis* when submitted to the torrefaction process. Three torrefaction temperatures (200 °C, 250 °C and 300 °C) with three residence times (20 min, 30 min and 40 min) were applied, and the biomass was analyzed for its Gravimetric Yield, Energy Yield and PCS. The variation in energy density, improvement in grinding and rest and slip angles of the torrefaction materials was determined, always in comparison with the fresh sample. It was observed that the temperature of the torrefaction process is the most impactful factor in modifying the physicochemical structures of the biomass, with the temperature of 300 °C being the one that provided the most significant improvements to the material. The highest PCS obtained was for torrefaction performed at 300 °C, showing an increase of 12.23% when compared to fresh biomass. The increase in temperature generates a material of smaller granulometry and more friable, facilitating the grinding operations, with the torrefaction carried out at 300 °C, producing a material with a diameter 25% smaller when compared to the fresh sample. After grinding, this biomass treated at 300 °C had a diameter 39.33% smaller when compared to the same torrefaction sample and 54.24% smaller when compared to the unground fresh sample. In relation to energy density, the increase in the apparent specific mass provided a gain of 24.85% and 28.25% for the apparent specific mass and bed. The angle of repose decreased as a result of the increase in temperature, with the slip angle showing the opposite behavior. Torrefaction proved to be a pre-treatment capable of adding energy value to the material, in addition to improving its physical characteristics, making it a more suitable fuel for insertion in energy generation systems.

**Key-words:** biomass; heat treatment; *Eucalyptus grandis*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Produção mundial de energia em 2018 por fontes .....	12
Figura 2-1. Principais rotas de conversão da biomassa em energia.....	16
Figura 2-2. Rede bibliométrica referente a trabalhos envolvendo torrefação de eucalipto .....	32
Figura 3-1. Metodologia aplicada para desenvolvimento do presente estudo	34
Figura 3-2. Reator utilizado para realização dos ensaios de torrefação.....	38
Figura 3-3. Aparato utilizado para determinação do ângulo de repouso .....	46
Figura 3-4. Prancha utilizada para determinação do ângulo de deslizamento	47
Figura 4-1. Distribuição granulométrica para a biomassa in natura .....	50
Figura 4-2. Biomassa de <i>Eucalyptus grandis in natura</i> e torrificada .....	51
Figura 4-3. RG em função do tempo de residência para cada uma das temperaturas estudadas .....	53
Figura 4-4. Variação do RG para os diferentes tempos de residência estudados .....	53
Figura 4-5. Rendimentos Gravimétricos obtidos neste trabalho em comparação com a literatura .....	54
Figura 4-6. Comparação entre massa específica aparente e de leito para os materiais in natura e torrificados .....	60
Figura 4-7. Comparação entre o PCS obtido neste trabalho com valores encontrados na literatura .....	64
Figura 4-8. Rendimento energético em função da temperatura de torrefação com valores de PCS obtidos pela análise elementar e imediata .....	66
Figura 4-9. Comparação entre os valores de densidade energética obtidos para massa específica aparente e massa específica de leito .....	68
Figura 4-10. Fração mássica da biomassa <i>in natura</i> e torrificada retida em cada peneira.....	70
Figura 4-11. Fração mássica da biomassa in natura e torrificada retida em cada peneira após o processo de moagem .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Resíduos gerados pelo setor florestal em 2018 .....	18
Tabela 2-2. Objetivos e biomassa utilizada nos trabalhos revisados.....	20
Tabela 2-3. Influência da torrefação no valor de HHV .....	28
Tabela 3-1. Peneiras utilizadas nos ensaios granulométricos.....	36
Tabela 3-2. Delineamento experimental para os ensaios de torrefação .....	39
Tabela 3-3. Normas utilizadas para determinação da análise imediata .....	41
Tabela 4-1. Diâmetros médios da biomassa in natura.....	49
Tabela 4-2. Dados dos ensaios de torrefação realizados .....	52
Tabela 4-3. Análise imediata realizada em base seca.....	55
Tabela 4-4. Análise imediata biomassa torrificada.....	56
Tabela 4-5. Dados análise elementar.....	57
Tabela 4-6. Coeficiente de variação análise elementar.....	57
Tabela 4-7. Valores de carbono, hidrogênio e oxigênio obtidos a partir das equações propostas por Nuchem (2016).....	58
Tabela 4-8. Massa específica aparente e de leito para os materiais in natura e torrificados.....	59
Tabela 4-9. PCS obtido por meio da análise imediata.....	60
Tabela 4-10. Valores de desvio padrão e coeficiente de variação para o PCS das amostras in natura comparadas ao valor experimental obtido por Cunha (2021). .....	61
Tabela 4-11. One-way ANOVA para as diferentes Equações utilizadas para determinar o PCS.....	62
Tabela 4-12. PCS obtido por meio da análise elementar.....	63
Tabela 4-13. Comparação entre os valores teóricos de PCS obtidos com o experimental determinado por Cunha (2021).....	63
Tabela 4-14. Rendimento Energético para as diferentes temperaturas de torrefação estudadas.....	66
Tabela 4-15. Densidade energética calculada a partir da massa específica aparente e massa específica de leito .....	67
Tabela 4-16. Distribuição do tamanho de partícula das amostras (% em massa) .....	69

Tabela 4-17. Diâmetros médios da biomassa in natura e do material torreficado .....	69
Tabela 4-18. Distribuição do tamanho de partícula das amostras (% em massa) após serem submetidas à moagem .....	71
Tabela 4-19. Diâmetros médios da biomassa in natura e do material torreficado após a moagem.....	71
Tabela 4-20. Ângulo de repouso das amostras torreficadas e in natura.....	73
Tabela 4-21. Ângulo de deslizamento das amostras torreficadas e in natura .	74

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
1.1	Objetivos .....	14
1.1.1	Objetivo Geral .....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Biomassa.....	15
2.1.1	Composição da biomassa lignocelulósica.....	17
2.2	Biomassa energética florestal .....	17
2.3	Torrefação .....	19
2.3.1	Estudos envolvendo a torrefação de diferentes biomassas.....	20
2.3.2	Influência da Torrefação no melhoramento energético.....	24
2.3.3	Influência da torrefação aos ataques microbiológicos e à lixiviação 29	
2.3.4	Torrefação na obtenção de produtos de alto valor agregado .....	30
2.3.5	Influência da torrefação na moagem.....	31
2.3.6	Pesquisa bibliométrica.....	32
3	METODOLOGIA .....	34
3.1	Determinação do teor de umidade .....	35
3.2	Determinação granulométrica .....	35
3.3	Ensaio de torrefação.....	38
3.4	Análise Imediata .....	40
3.5	Análise elementar.....	42
3.6	Poder Calorífico.....	43
3.7	Determinação da Massa Específica Real .....	44
3.8	Determinação da massa específica aparente e de leito .....	45
3.9	Determinação da melhoria da moagem .....	46

	10
3.10	Ângulo de repouso..... 46
3.11	Teste de Plano Inclinado ..... 46
3.12	Análise Estatística ..... 47
4	Resultados e Discussão ..... 49
4.1	Umidade relativa da biomassa <i>in natura</i> ..... 49
4.2	Distribuição granulométrica do material <i>in natura</i> ..... 49
4.3	Ensaio de torrefação..... 50
4.4	Análise Imediata biomassa <i>in natura</i> ..... 55
4.5	Análise imediata biomassa torrificada ..... 56
4.6	Análise Elementar ..... 57
4.7	Massa específica real ..... 58
4.8	Massa específica aparente e de leito ..... 59
4.9	Poder Calorífico Superior..... 60
4.10	Densidade Energética..... 66
4.11	Determinação da granulometria em função da temperatura de torrefação 68
4.12	Determinação da melhoria da moagem..... 70
4.13	Ângulo de repouso..... 73
4.14	Teste plano inclinado ..... 73
5	Conclusões ..... 75
6	Sugestões para trabalhos futuros ..... 76
REFERÊNCIAS	..... 77

## 1 INTRODUÇÃO

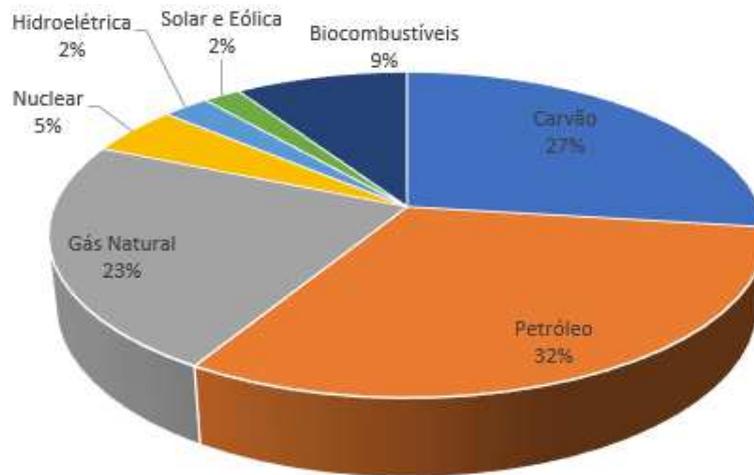
A biomassa é uma fonte promissora para geração energética e com ampla expansão na sua utilização em nível mundial. Entretanto, algumas características de sua composição físico-química atuam como entraves para o favorecimento da competitividade frente aos combustíveis fósseis, entre eles: alto teor de umidade, baixo poder calorífico, baixa densidade energética, higroscopicidade e baixa homogeneidade.

Estas características podem ser melhoradas por procedimentos de pré-tratamento da biomassa, e neste sentido o presente estudo avaliou a torrefação como uma estratégia para melhoria energética de biomassa residual de *Eucalyptus grandis*, devido ao fato de permitir a utilização de equipamentos e temperaturas relativamente simples e baixas, respectivamente, para a execução do processo.

A tendência em utilizar energia renovável como substituta dos combustíveis fósseis está em plena expansão por motivações financeiras e ambientais em todo o mundo. São notáveis as pesquisas e prospecções tecnológicas cada vez mais inseridas no contexto do uso de fontes de energia não convencionais, com a utilização da biomassa bastante impulsionada no Brasil, por ser um recurso renovável e de grande disponibilidade no país. Sendo importante ressaltar que a autossuficiência no setor energético é um fator indicativo do desenvolvimento socioeconômico de qualquer nação, e a adoção de medidas estratégicas pautadas no desenvolvimento sustentável são extremamente promissoras ((LÚCIO DE ARAGÃO PEDROSO et al., 2018).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia, 2019, a produção mundial de energia segundo suas fontes de obtenção, em 2018, foi a que está representada na Figura 1-1.

Figura 1-1. Produção mundial de energia em 2018 por fontes



Fonte: Agência Internacional de Energia (2020).

Pensando em nível nacional e especificamente na matriz elétrica, em 2019 83% da oferta interna de eletricidade foi oriunda de fontes renováveis, com a fonte hídrica representando 64,9%, a biomassa 8,4%, eólica 8,6% e solar 1% (Balanço Energético Nacional, 2020).

Para evitar a estagnação em uma única fonte de energia e propiciar geração de renda e diversificação da matriz energética nacional, o Projeto de Lei nº 3.529/2012 prevê uma política nacional de geração de energia elétrica advinda da biomassa, determinando a obrigatoriedade em ser realizada a contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional, tornando inevitável a participação da biomassa na matriz energética brasileira.

A biomassa pode ser convertida em material energético, geralmente, pelas vias termoquímicas, bioquímicas e físico-químicas. O ramo termoquímico está baseado na aplicação de calor para geração direta de energia ou para produção de produtos com alta densidade energética. A rota bioquímica se utiliza dos processos aeróbicos, anaeróbicos e enzimáticos, e a físico-química está principalmente baseada na extração física por compressão seguida da tecnologia de transesterificação para produção de biocombustíveis (JUNIOR *et al.*, 2018).

A composição crua da biomassa apresenta algumas deficiências notáveis quando comparada com os combustíveis fósseis e pensando em destinações energéticas. Entre elas, pode-se citar o seu alto teor de umidade e baixo valor de

poder calorífico, baixa densidade de energia, alta higroscopicidade (que induz maior facilidade em ocorrer sua biodegradação), baixa friabilidade (dificultando sua moagem), baixa homogeneidade etc. (LI *et al.*, 2020).

Com isso, uma forma de promover melhorias no material é aplicando pré-tratamentos tais como a torrefação, que é um processo cuja importância está tornando-se cada vez mais evidente, uma vez que pode propiciar uma via para obtenção de energia renovável partindo de inúmeros tipos de biomassas, desde aquelas destinadas para geração energética (como as florestas plantadas) até os compostos residuais de inúmeros processos agroindustriais (ONSREE *et al.*, 2020).

Em relação ao material residual gerado pelo setor florestal, apenas em 2018 foram gerados 52,22 milhões de toneladas concentradas tanto na etapa de atividade florestal (36,85 milhões de toneladas) quanto na etapa de processamento industrial (15,37 milhões de toneladas), constituído por material passível de ter seu valor agregado por métodos de pré-tratamento e posterior destinação para geração energética (IBÁ, 2019).

A utilização de resíduos do setor florestal para geração energética, especificamente a serragem de eucalipto (a espécie florestal mais cultivada no território brasileiro), é promissora e apresenta pontos socioambientais contundentes, uma vez que se trata de um resíduo de uma fonte renovável que pode ter suas características melhoradas e, com isso, facilitar sua inserção em processos de queima em reator de leito fluidizado.

A biomassa *in natura* de eucalipto possui elevada umidade e baixa densidade energética, tornando necessário, em processos de combustão, muito mais material para se obter a mesma quantidade de energia que seria obtida com a aplicação de carvão, por exemplo, sendo essa uma das possíveis frentes de atuação da torrefação.

Executando a torrefação neste resíduo florestal, espera-se que ocorra uma agregação de valor, obtendo um produto com maior poder calorífico, menor teor de voláteis de baixo poder calorífico, maior friabilidade, hidrofobicidade e homogeneidade. Ou seja, um combustível com maior densidade energética e passível de ser inserido com sucesso em processos de geração energética já existentes.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi verificar as modificações produzidas na biomassa oriunda de *Eucalyptus grandis* quando submetida ao processo de torrefação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Comparar o poder calorífico, a densidade energética, a composição imediata e elementar o teor de umidade da biomassa torrificada em relação a biomassa *in natura*;
- b) Determinar a temperatura e tempo de residência ideal para a torrefação desta biomassa;
- c) Avaliar a melhoria no processo de moagem do material torrificado em comparação com a amostra *in natura*; e
- d) Avaliar as alterações nos ângulos de repouso e deslizamento do material torrificado em comparação com a amostra *in natura*.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Biomassa

Enquadrada como uma fonte primária de energia, não fóssil, podendo ser matéria orgânica vegetal ou animal, a biomassa possui estoques de energia química que podem ser destinados para geração energética. Sendo o termo biomassa aplicado para materiais orgânicos ou biológicos com capacidade de serem empregados na produção de energia renovável (EPE, 2020).

Tratando-se de biomassa vegetal, grande parte da composição energética é advinda da radiação solar, uma vez que é através dela que as plantas convertem a energia luminosa em energia química, por meio da fotossíntese (ASCENÇÃO E MALAGUTTI, 2019).

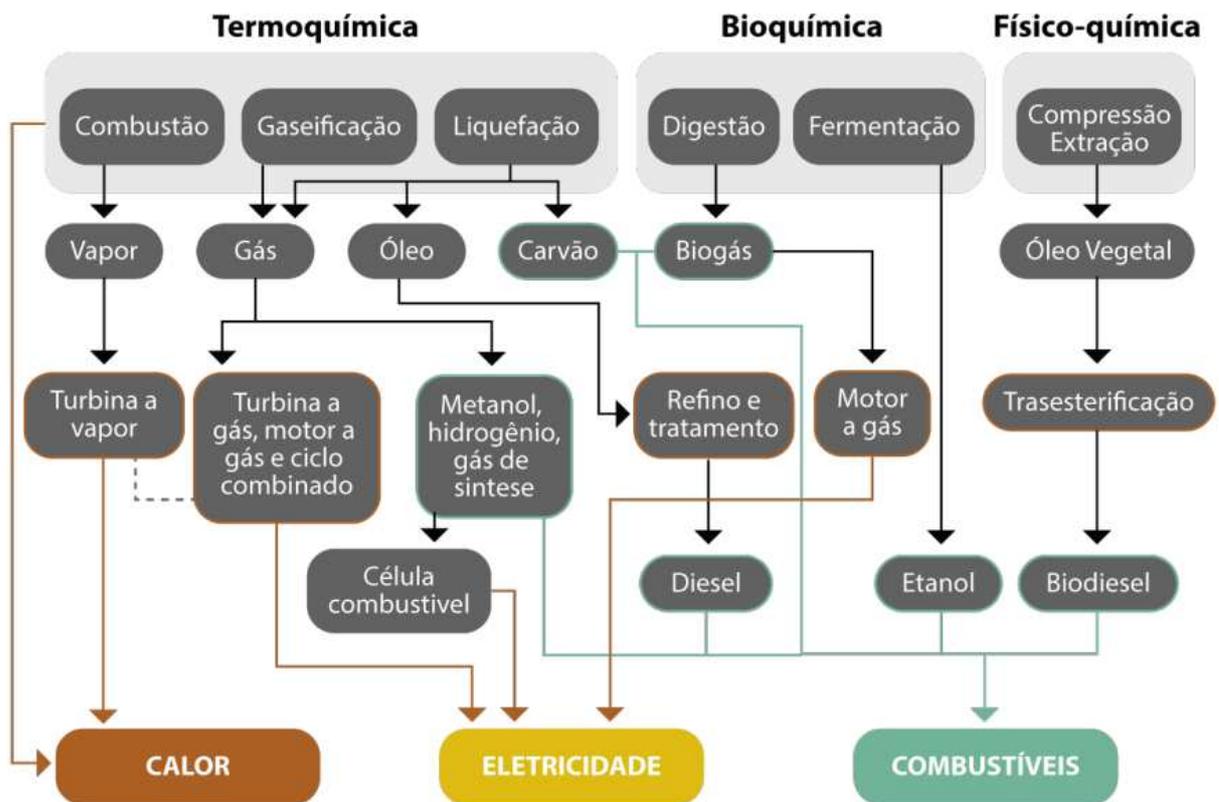
O baixo custo, as grandes reservas e a facilidade em obtenção em curto espaço de tempo fazem da biomassa uma excelente fonte de energia renovável (FLEIG et al., 2020). Estes fatores contribuem para que uma grande e crescente atenção seja voltada para tal recurso, podendo ele ser usado na substituição dos combustíveis fósseis com uma emissão muito inferior de CO<sub>2</sub> (SETKIT *et al.*, 2020).

Além dos aspectos ambientais, a demanda das empresas por biomassa possui a redução de custos como principal objetivo quando realizam a substituição dos combustíveis fósseis. Sendo a biomassa vegetal capaz de reduzir o uso de recursos naturais para geração de energia, possuir preços competitivos e gerar baixos impactos ambientais (AREIAS *et al.*, 2020).

A matriz energética brasileira destaca-se perante a utilização de fontes renováveis de energia, com 46,2% da oferta interna sendo representada pelas fontes: hidráulica, lenha e carvão vegetal, derivados da cana-de-açúcar, eólica, solar e demais fontes renováveis. Em relação ao fluxo de energia elétrica, 8,1% dos 651,3 TWh ofertados no Brasil em 2019 foram obtidos pelo uso de biomassas, ou seja, 52,5 TWh (EPE, 2020). O setor industrial foi o maior consumidor de energia advinda de biomassa, com 39,6% do total, seguido pelo setor de transportes (26,8%) e energético (19%).

Em relação a forma como a biomassa pode ser convertida em energia, as principais rotas de transformação são a termoquímica, bioquímica e físico-química, como pode ser verificado na Figura 2-1.

Figura 2-1. Principais rotas de conversão da biomassa em energia



Fonte: Guimarães *et al.* (2020).

Das possíveis rotas, a termoquímica apresenta como vantagem o não requerimento de purificação extra e longos tempos reacionais, diferente do que ocorre nas rotas bioquímicas e físico-químicas (GUIMARÃES *et al.*, 2020).

Quanto a sua origem para finalidades energéticas, as biomassas podem ser classificadas como:

- Biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos;
- Biomassa energética da agropecuária, as culturas agro energéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e
- Biomassa energética advinda de rejeitos urbanos.

A biomassa energética florestal é composta por materiais lignocelulósicos que representam uma interessante opção dentre as biomassas, principalmente ao serem considerados os resíduos provenientes da indústria de papel e celulose, agroindustriais e alimentícias, por exemplo (KLAFKE, 2018).

### 2.1.1 Composição da biomassa lignocelulósica

Materiais lignocelulósicos são compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, exibindo uma estrutura cristalina vegetal altamente estável. A celulose, composto mais abundante, é um polissacarídeo formado por moléculas de glicose unidas por meio de ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas, estabilizadas e ligadas entre si por pontes de hidrogênio de forma intra e intermoleculares, gerando as fibrilas elementares, que possuem 36 cadeias justapostas e são unidas umas às outras através da hemicelulose. A hemicelulose, por sua vez, é o segundo composto mais abundante em materiais lignocelulósicos, constituído por um polissacarídeo amorfo de vários açúcares de cinco e seis carbonos, tais como: arabinose, galactose, glicose, manose e xilose, além de desoxiaçúcares e ácidos urônicos. Por fim, estas estruturas são cobertas pela lignina, que é um polímero aromático formado por três estruturas básicas fenólicas, o álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e o álcool sinapílico e seus derivados (RODRIGUES *et al.*, 2017).

## 2.2 Biomassa energética florestal

Até a Revolução Industrial, a lenha foi o produto energético primário para todos os povos existentes, posteriormente substituída pelo carvão mineral na estrutura energética dos países desenvolvidos. Entretanto, até hoje é a fonte primária de energia para inúmeros povos, principalmente para as populações dos países subdesenvolvidos (SOARES *et al.*, 2006).

A biomassa florestal pode ser utilizada como uma fonte limpa de energia, renovável e geradora de empregos. Composta por materiais orgânicos dispostos tanto acima (tocos, galhos, fuste, cascas, sementes e folhagens) quanto abaixo do solo (raízes), quando aplicada para geração energética, pode ser oriunda de florestas com

esta finalidade específica, ou por meio do aproveitamento dos resíduos gerados no processo de colheita e processamento da madeira (SOARES *et al.*, 2006).

Em 2018, o setor florestal nacional impulsionou a economia com um Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 86,6 bilhões, representando 1,3% do PIB nacional e 6,9% do PIB industrial, configurando um estoque de CO<sub>2</sub> equivalente de 4,2 bilhões de toneladas para o segmento, cujo escoamento é feito principalmente nas indústrias de papel e celulose, processamento em painéis de madeira e pisos laminados e produtos sólidos de madeira (IBÁ, 2019).

A área ocupada por árvores plantadas no país atingiu 7,83 milhões de hectares no ano de 2018, com o plantio de eucalipto representando 5,7 milhões de hectares, seguido por 1,6 milhão de hectares de pinus e o restante, 590 mil hectares, por demais culturas, tais como seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2020).

Atualmente, no que tange a participação do setor florestal nacional na geração de eletricidade, verifica-se que as principais fontes são a lenha e lixívia que, em 2018, foram responsáveis pela geração de 16,44 TWh de energia elétrica, correspondendo a 3,32% da geração de energia elétrica oriunda de fontes renováveis (EPE, 2020).

Uma fonte promissora para geração energética está centrada nos resíduos gerados pelo setor, que podem ser advindos da atividade florestal e da industrial, onde a geração para o ano de 2018 pode ser verificada na Tabela 2-1.

Tabela 2-1. Resíduos gerados pelo setor florestal em 2018

<b>Atividade</b>	<b>Resíduos</b>	<b>Milhões de Toneladas</b>
Florestal (70,9%)	Cascas, Galhos e Folhas	36,11
	Óleos, Graxas e Embalagens de agroquímicos	0,74
Industrial (29,1%)	Cavacos, Serragem e Licor Preto	9,72
	Cavacos, Serragem e Aparas de Papel	4,52

	Lama de Cal e Cinzas de Caldeiras	0,70
	Compostos Químicos e Outros	0,43

Fonte: Adaptado de IBÁ (2019).

A biomassa residual pode ser adequadamente aplicada para geração energética, entretanto, para as biomassas como um todo, é necessário atentar para o fato de serem um combustível sólido em muitos casos polidisperso e de baixa densidade, tornando necessários métodos de conversão que tornem a biomassa um combustível competitivo (FELFI et al., 2000).

### 2.3 Torrefação

A torrefação é um processo termoquímico que ocorre na fase endotérmica da pirólise numa faixa de temperatura de 200-300 °C, resultando em um material intermediário entre a madeira e o carvão. Nesta fase ocorre a degradação da hemicelulose, também sendo removida a umidade, o ácido acético, frações de fenol e demais compostos de baixo poder calorífico (FELFLI *et al.*, 2000).

Os principais fatores que afetam a torrefação são a temperatura, o tempo de reação, a taxa de aquecimento, o tamanho da partícula, a composição da atmosfera de trabalho e a composição da biomassa (CARNEIRO, 2015).

A temperatura é o fator preponderante uma vez que atua na decomposição dos componentes do material torrado. A elevação da temperatura volatiliza os componentes mais leves da biomassa, como extrativos e hemicelulose, gerando um sólido de maior poder calorífico superior (GUIMARÃES, 2016).

Como descrito por Macêdo (2012), inicialmente a torrefação foi almejada como precursora de um substituto ao carvão vegetal; posteriormente, na década de 90, foi orientada para a produção de madeira de construção, devido ao fato de que a madeira torrificada apresentar vantagens como a redução da higroscopicidade e aumento da durabilidade natural; e, a partir dos anos 2000, voltou-se para fins energéticos, principalmente como método de pré-tratamento da biomassa.

### 2.3.1 Estudos envolvendo a torrefação de diferentes biomassas

A torrefação vem sendo amplamente estudada devido às variações físico-químicas possibilitadas ao administrá-la em diferentes configurações de parâmetros. A Tabela 2-2 é referente a estudos onde variadas biomassas foram submetidas ao processo de torrefação com finalidades distintas.

Tabela 2-2. Objetivos e biomassa utilizada nos trabalhos revisados

<b>Objetivo do Estudo</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Referência</b>
Avaliar o melhoramento energético da biomassa ao ser submetida pelo processo de torrefação bem como estudar o processo.	<i>Eucalyptus grandis</i>	Silveira et al. (2021)
Avaliar a resistência a lixiviação e ataques microbiológicos da biomassa torrificada.	<i>Eucalyptus spp.</i> , <i>Pinus sp.</i> ) e <i>Cofea arabica L.</i>	De Faria et al. (2020)
Avaliar a agragação de valor dos subprodutos gerados por pirólise da biomassa torrificada	Resíduos de eucalipto	Zheng et al. (2020)
Avaliar as mudanças na estrutura da celulose da biomassa torrificada	<i>E. botryoides</i> , <i>E. globulus</i> <i>E. grandis</i> , <i>E. maculata</i> , <i>E. propinqua</i> , <i>E. rudis</i> , <i>E. saligna</i> e <i>E. viminalis</i>	Lourenço et al. (2020)
Avaliar o melhoramento energético da biomassa ao ser submetida pelo processo de torrefação	Caule de guandu e eucalipto	Singh et al. (2020)
Avaliar o efeito da severidade da torrefação e da proporção do carreador de oxigênio para a biomassa torrificada na produção de gás de síntese e remoção de alcatrão.	Madeira de eucalipto	Zheng et al. (2020)
Determinar a temperatura na qual o cloro é eliminado durante o processo de torrefação	<i>Eucalyptus globulus</i>	Sá et al. (2020)
Avaliar o melhoramento energético da biomassa ao ser submetida pelo processo de torrefação	<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Shing et al. (2020)
Avaliar o melhoramento energético da biomassa ao ser	Madeira de eucalipto processada	Da Silva et al. (2020)

submetida pelo processo de torrefação		
Avaliar o efeito do pré-tratamento da torrefação na produção de gás de síntese e na formação de alcatrão a partir da gaseificação	Madeira de eucalipto processada	Fan et al. (2020)
Avaliar as mudanças nas características da biomassa torrificada	<i>Eucalyptus spp.</i>	Romão e Conte (2020)
Avaliar o efeito da temperatura e taxa de aquecimento no processo de torrefação	<i>Eucalyptus grandis</i>	Silveira et al. (2019)
Avaliar a resistência a ataques microbiológicos da biomassa torrificada	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Castro et al. (2019)
Determinar os compostos voláteis emitidos e seu possível impacto no odor de pellets torrificadas	<i>Eucalyptus spp.</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Vitis vinifera</i> , <i>Pinus sylvestris</i> e <i>Picea abies</i>	Pöllinger-Zierler et al. (2019)
Avaliar propriedades físico-químicas da biomassa torrificada	<i>E. grandis</i> , <i>G. arborea</i> , <i>P. patula</i> <i>P. aximinoi</i>	Pérez et al. (2017)
Definir a melhor condição para uso da biomassa <i>in natura</i> e torrificada como combustível em caldeiras	<i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus citriodora</i>	Ignacio et al. (2019)
Avaliar a influência da temperatura e tempo no processo de torrefação	Folhas, madeira e casca de eucalipto	Cardona et al. (2019)
Avaliar as melhorias obtidas na biomassa ao ser submetida pelo processo de torrefação	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Figueiró et al. (2019)
Avaliar o efeito da temperatura de torrefação nas propriedades dos briquetes.	Bagaço de <i>Saccharum officinarum</i> L. e <i>Eucalyptus spp.</i>	Costa et al. (2017)
Avaliar o efeito de uma torrefação suave (de 160 a 230 °C) nas propriedades do material torrificado	Oito espécies de <i>Eucalyptus</i>	Araujo et al. (2018)
Avaliar as propriedades do material torrificado e determinar a temperatura ideal para o processo	Madeira de eucalipto, pinheiro e castanheiro	Álvarez et al. (2018)
Avaliar os efeitos das temperaturas de pirólise, razão catalisador-para-) e tamanhos de aglomerados de metal nas reações de melhoria utilizando biomassa torrificada	<i>Eucalyptus globulus</i>	Arteaga-Pérez et al. (2018)
Descrever a utilização e caracterização de um sistema	<i>Eucalyptus grandis</i>	Silveira et al. (2018)

acústico acoplado a um reator de torrefação		
Avaliar as alterações estruturais e composicionais na biomassa submetida à torrefação	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Silva et al. (2018)
Avaliar o melhoramento energético da biomassa ao ser submetida pelo processo de torrefação seguido pela peletização.	<i>Eucalyptus globulus</i>	Arteaga-Pérez et al. (2017)
Avaliar as propriedades da biomassa torrificada e peletizada	<i>Eucalyptus globulus</i>	Pinto et al. (2017)
Avaliar o efeito do pré-tratamento da torrefação na cinética, no mecanismo de reação e no fluxo de calor durante a pirólise da biomassa.	Eucalyptus clone <i>E. urophylla (Timor) × E. camaldulensis (VM1)</i>	Doddapaneni et al. (2016)
Descrever a estabilidade à degradação térmica e a composição química da biomassa lenhosa submetida ao processo de torrefação	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Silva et al. (2016)
Avaliar a combustibilidade do eucalipto torrificado em diferentes temperaturas em comparação com carvões de teores de matéria volátil semelhantes.	<i>Eucalyptus saligna</i>	Pohlmann et al. (2016)
Avaliar as propriedades de briquetes produzidos a partir de biomassa <i>in natura</i> e torrificada	<i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus spp.</i>	Araújo et al. (2016)
Avaliar os benefícios do processo de torrefação nas propriedades energéticas da biomassa.	<i>Eucalyptus grandis</i>	Borges et al. (2016)
Avaliar aspectos técnicos da tecnologia de torrefação, analisando as mudanças de energia e exergia por meio de um modelo físico-químico abrangente.	<i>Eucalyptus globulus</i> e <i>Pinus radiata</i>	Arteaga-Pérez et al. (2015)
Avaliar a combustão da biomassa torrificada	<i>Eucalyptus gunnii</i> e <i>Salix spp.</i>	McNamee et al. (2015)
Avaliar a formação térmica de poluentes orgânicos persistentes, como as dioxinas, no produto sólido torrificado.	Cavacos de madeira de eucalipto	Gao et al. (2015)
Avaliar as mudanças morfológicas e estruturais de diferentes tipos de biomassa após a torrefação e os	<i>Pinus Illiotis</i> , <i>Acacia mangium</i> <i>Eucalyptus saligna</i>	Pohlmann et al. (2014)

processos de carbonização a baixa temperatura.		
Avaliar as características endotérmicas e/ou exotérmicas da biomassa durante a torrefação	Madeira de eucalipto	Chen et al. (2014)
Comparar os impactos econômicos e ambientais da torrefação nas cadeias de abastecimento de bioenergia com pellets convencionais	<i>Eucalyptus</i>	Batidzirai et al. (2014)
Avaliar e comparar o efeito da torrefação no poder calorífico, composição elementar e teor de cloro de oito biomassas lenhosas	<i>Eucalyptus dunnii</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Betula pubescens</i> , <i>Populus tremula</i> , <i>Pinus sylvestris</i> e <i>Picea abies</i>	Keipi et al. (2014)
Avaliar o potencial da torrefação oxidativa e seu impacto na estrutura interna da biomassa.	Oil palm fiber, Coconut fiber, Eucalyptus e <i>Cryptomeria japonica</i>	Chen et al. (2014)
Buscar as condições ideais para a torrefação por meio da análise da superfície de resposta	<i>Eucalyptus globulus</i>	Kim et al. (2013)
Avaliar parâmetros da gaseificação de pellets torreficados	<i>Spirulina platensis</i> e <i>Eucalyptus globulus</i>	Yang et al. (2013)
Avaliar diferentes tipos de modelos cinéticos e propor um conjunto de parâmetros cinéticos para simular o processo de torrefação	<i>Eucalyptus</i>	Cavagnol et al. (2013)
Avaliar o comportamento térmico de briquetes <i>in natura</i> e torreficados	Serragem de eucalipto e <i>Coffea arábica</i> L.	Protásio et al. (2013)
Avaliar as características de reação de biomassa submetida a torrefação não oxidativa e oxidativa em várias velocidades superficiais.	Fibra de dendê, fibra de coco, eucalipto e <i>Cryptomeria japonica</i>	Chen et al. (2013)
Desenvolver um modelo termoquímico para descrever as propriedades térmicas, químicas e físicas, bem como as taxas de liberação de calor do processo de torrefação	<i>Eucalyptus</i>	Bates et al. (2013)
Empregar o método de Taguchi para abordar a operação ótima de co-gaseificação de biomassa torreficada e carvão em um gaseificador de fluxo arrastado	<i>Eucalyptus</i>	Chen et al. (2013)

Avaliar propriedades físico-químicas de biomassas torrificadas	Madeiras de salgueiro, eucalipto, carvalho, bétula, abetos e pinheiros.	Ibrahim et al. (2013)
Avaliar a moagem da biomassa torrificadas.	<i>Eucalyptus spp.</i>	Rousset et al. (2013)
Avaliar a torrefação de biomassa lenhosa a fim de melhorar suas propriedades para sistemas pulverizados	<i>Eucalyptus</i>	Arias et al. (2008)

Nos estudos revisados, foi possível observar que o tópico de maior interesse está relacionado com as alterações energéticas produzidas no material torrificado, ou seja, quais os impactos do processo de torrefação no melhoramento energético das biomassas estudadas. Também se constata um interesse em avaliar as melhorias obtidas em relação a ataques microbiológicos e à moagem do material. E, em menor quantidade, alguns autores tiveram por objetivo avaliar a possibilidade de se obter materiais de alto valor agregado por meio do processo de torrefação.

### 2.3.2 Influência da Torrefação no melhoramento energético

Uma das variáveis de grande interesse no estudo da torrefação de biomassa é o valor de HHV. Como disposto na Tabela 2-3, é possível observar que, conforme se eleva a temperatura, são obtidos valores maiores para o HHV da biomassa torrificada. Entretanto, como ressaltado por inúmeros dos autores aqui abordados, a elevação da temperatura também promove uma menor quantidade de sólidos. Assim sendo, a faixa de temperatura entre 250-270 °C parece ser a ideal para a torrefação de biomassas oriundas do gênero *Eucalyptus* (Singh et al.; 2020, Da Silva et al.; 2020, Romão e Conte 2020, Arteaga-Pérez et al.; 2015 e Silveira et al. 2019).

O tempo de residência, por outro lado, não atua de forma tão significativa se comparada com a temperatura. Sendo que um tempo de residência entre 15-30 min parecem ser suficientes para produzir alterações significativas no material, com pouca ou nenhuma variação após este período (De Faria et al. 2020, Arteaga-Pérez et al.; 2015 e Ibrahim et al.; 2013).

Singh et al., (2020), estudaram a torrefação do caule de eucalipto em reator tubular de quartzo nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C com tempo de residência e taxa de aquecimento constantes sob atmosfera inerte. A torrefação a 250 °C propiciou um rendimento de sólidos entre 63-64% para ambas as biomassas, com

subprodutos líquidos na faixa de 19-29% e de gases não condensáveis entre 8-18%. Em relação ao HHV, foi observado um aumento de 39,8% para o eucalipto. O poder calorífico superior do subproduto líquido ficou na faixa de 7620-11200 kJ.kg<sup>-1</sup>, enquanto o seu conteúdo de água ficou estabelecido entre 52,8-83,5% em peso. Os gases não condensáveis eram formados basicamente por CO<sub>2</sub> e CO, com o dióxido de carbono diminuindo com o aumento da temperatura. Com o aumento da temperatura também foi observado que o valor de energia e exergia do produto sólido diminuiu, enquanto para os gases não condensáveis e o líquido foi observado o comportamento inverso. A eficiência exergética do produto sólido encontrada pelos autores está na faixa de 52-54% sob torrefação moderada (250 °C), com a irreversibilidade aumentando com a elevação da temperatura. Os autores concluíram que a torrefação na temperatura de 300 °C não é adequada em decorrência do baixo rendimento de sólidos e alto rendimento de subprodutos, sendo a torrefação moderada (250 °C) a condição mais promissora para se atingir um equilíbrio entre a eficiência geral e as propriedades físico-químicas desejadas.

Romão e Conte (2021) avaliaram as mudanças nas características de *Eucalyptus spp.* após serem torrificadas nas temperaturas de 240, 260 e 280 °C com tempo de residência de 30 e 60 min. Os autores determinaram a composição elementar, HHV e análise termogravimétrica. Os resultados indicaram que houve redução nas relações O/C e H/C, causando um aumento na qualidade da energia térmica da madeira torrificada em cerca de 28% e 47% em temperaturas de 260 °C com tempo de residência de 60 minutos e 280 °C com 30 minutos, respectivamente. A análise termogravimétrica, por sua vez, mostrou que a 260 °C a hemicelulose estava quase totalmente degradada, deixando o combustível em melhores condições para os processos de combustão ou gaseificação.

Cardona et al., (2018) realizaram a torrefação de resíduos de eucalipto (folhas, madeira e casca) com o objetivo de avaliar a influência da temperatura e do tempo de residência no processo. Os autores propuseram uma nova variável de resposta, denominada Energy Gain (EG), demonstrando que esta foi melhor do que a variável de resposta Energy Yield (EY), tradicionalmente utilizada na medição da eficiência da torrefação. Neste estudo, o maior ganho em EG foi nas condições de 300 °C e 60 min, onde o HHV obtido foi de 23,5 kJ kg<sup>-1</sup>, com uma densificação energética de 29% em relação a biomassa *in natura*, com características próximas ao carvão lignite. Os autores também propuseram um processo integrado, onde a combustão dos gases

de exaustão da torrefação é utilizada para gerar o calor necessário para a secagem e torrefação e, com isso, sendo capaz de suprir 72% das necessidades energéticas de uma planta operando com 20 ton.dia<sup>-1</sup>.

Shing et al., (2020) utilizaram um reator tubular de quartzo no estudo da torrefação de eucalipto sob atmosfera inerte em temperaturas situadas entre 220-280 °C e tempos de residência entre 20-60 min. Os autores observaram que a temperatura e o tempo de residência têm efeitos negativos e positivos no rendimento de sólidos e HHV, respectivamente. A temperatura teve um impacto mais severo nas propriedades físico-químicas em comparação com o tempo de residência. Com base no HHV máximo, a condição ótima foi obtida perto de 280 °C e 60 min de tempo de residência. Houve um aumento de 37,1 e 12,9% em HHV e densidade de energia, respectivamente, para a biomassa tratada a 280 °C por 60 min em relação ao material *in natura*, com os parâmetros cinéticos revelando que a energia de ativação geral diminuiu de 179,1 para 81,7 kJ.mol<sup>-1</sup> para a biomassa torrificada em comparação com a *in natura*. Os autores concluíram que a biomassa torrificada apresentou melhores propriedades de combustível sólido para co-combustão com carvão.

Figueiró et al., (2019) realizaram um estudo experimental avaliando a torrefação de cavacos de madeira de eucalipto. Os resultados obtidos permitiram que os autores concluíssem que a torrefação promoveu aumentos nos teores de carbono, energia e cinzas dos cavacos de madeira, além de reduções do conteúdo de material volátil, umidade de equilíbrio e tamanho médio, com as densidades de massa e energia exibindo um aumento inicial com uma redução posterior. Em geral, os cavacos torificados apresentam melhores índices de qualidade para a produção de calor e energia do que os cavacos *in natura*.

Arteaga-Pérez et al., (2017), realizaram a torrefação de *Eucalyptus globulus* em temperaturas situadas entre 245-265 °C em uma planta piloto de 100 kg.h<sup>-1</sup>. A biomassa torrificada foi posteriormente peletizada em uma unidade de 300 kg.h<sup>-1</sup> e os pellets foram submetidos a testes de durabilidade, densidade e combustão. Os autores analisaram as mudanças estruturais medidas com FTIR juntamente com o comportamento de combustão dos materiais. A análise de composição mostrou que o aumento da temperatura de torrefação reduziu a fração de hemicelulose e o rendimento de massa total. Além disso, houve uma relação linear entre o rendimento de energia e o rendimento de massa para essas amostras, que apresentaram alta

durabilidade (98%) e tiveram uma densidade de energia (13-14 GJ.m<sup>-3</sup>), que é comparável a determinados tipos de carvões.

Araujo et al., (2018) efetivaram a torrefação de oito espécies de eucalipto com as temperaturas do processo indo de 160 até 230 °C. Foram utilizadas pranchas de madeira e, dependendo da temperatura de tratamento e da madeira, a fase de condicionamento levou de 5 a 15 h. A torrefação promoveu o aumento de HHV em comparação com as amostras *in natura* (19 MJ.kg<sup>-1</sup> e 21 MJ.kg<sup>-1</sup>, respectivamente). O teor de carbono aumentou de 48,2% para 53,3% e a razão C/O de 1,08 para 1,35. As amostras de madeira torrificada mostraram maior estabilidade térmica com um deslocamento dos picos de perda de massa para temperaturas mais altas e uma massa residual maior a 450 °C de 36%, em comparação com 30% das amostras *in natura*. A torrefação elevou a concentração dos componentes mais energéticos e termicamente resistentes presentes na biomassa e diminuiu seu teor de enxofre e cloro, levando a um melhor desempenho de combustão. A madeira das oito espécies de *Eucalyptus* teve comportamento semelhante e apresentou melhora de qualidade. Com isso, os autores concluíram que a torrefação apresentou potencial como um pré-tratamento para o aproveitamento do combustível de biomassa de eucalipto.

Araújo et al., (2016) realizaram a torrefação *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus spp.* nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C por 60 min em atmosfera inerte. Em seguida, efetivaram a densificação por briquetagem das partículas de madeira. Os briquetes foram produzidos com partículas de madeira *in natura* e torrificada, utilizando 120 °C, por 7 min de prensagem e 6 min de resfriamento, sob pressões de 6,9, 10,3 e 13,8 MPa. A pressão de compactação da briquetagem não apresentou influência significativa nas propriedades dos briquetes. A densidade dos briquetes foi semelhante para todos os casos apresentando 1,14 g.cm<sup>-3</sup> para *Eucalyptus spp.* e 1,06 g.cm<sup>3</sup> para madeira de *Eucalyptus grandis*. Uma leve torrefação da madeira a 200 e 220 °C aumentou a energia potencial das partículas e briquetes, apresentando uma melhora em sua densidade, estabilidade dimensional e higroscopicidade. Briquetes produzidos a partir de *Eucalyptus spp.* apresentaram maior densidade de energia (24,79 GJ.m<sup>-3</sup>) no tratamento a 200 °C quando comparada com a madeira não tratada (20,76 GJ.m<sup>-3</sup>). Em relação a *E. grandis*, os briquetes produzidos com partículas torrificadas a 200 °C apresentaram apenas um teor de energia marginal superior do que com madeira *in natura*, 21,70 GJ.m<sup>-3</sup> e 21,38 GJ.m<sup>-3</sup>, respectivamente. Os autores constataram que as duas madeiras de eucalipto apresentaram diferenças

quanto ao tratamento térmico e briquetagem, indicando que a otimização desses processos deve ser específica para cada espécie. Entretanto, uma torrefação moderada das partículas de madeira diminuiu as diferenças entre os materiais, o que pode ser útil como um processo para aumentar a homogeneidade da biomassa ao se utilizar biomassas misturadas.

Tabela 2-3. Influência da torrefação no valor de HHV

Biomassa	T de Torrefação (°C)	t de residência (min)	HHV (MJ.kg <sup>-1</sup> )	Referência
<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>In natura</i>	-	18,08	Silveira et al. (2021)
	210	60	18,18	
	230	60	18,60	
	250	60	19,00	
	270	60	19,40	
	290	60	19,91	
<i>Eucalyptus spp.</i>	<i>In natura</i>	-	17,43	De Faria et al. (2020)
	290	10	19,22	
	290	15	20,46	
	290	20	20,52	
Eucalipto	<i>In natura</i>	-	17,80	Singh et al. (2020)
	200	30	19,10	
	250	30	21,20	
	300	30	24,89	
Resíduos de Eucalipto	<i>In natura</i>	-	18,62	Da Silva et al. (2020)
	180	60	19,22	
	220	60	19,22	
<i>Eucalyptus spp.</i>	<i>In natura</i>	-	17,42	Romão e Conte (2020)
	240	30	20,54	
	260	30	20,84	
	280	30	25,61	
<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>In natura</i>	-	20,09	Silveira et al. (2019)
	250	60	21,47	
	270	60	22,52	
Resíduos de eucalipto	<i>In natura</i>	-	18,10	Cardona et al. (2019)
	250	20	20,40	
	275	20	21,00	
	300	20	21,70	
Eucalipto	<i>In natura</i>	-	17,65	Alvarez et al. (2018)
	200	20	19,05	
	225	20	19,65	
	250	20	19,30	
	275	20	21,40	
	300	20	23,34	
<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>In natura</i>	-	18,70	Arteaga-Pérez et al. (2018)
304	15	20,10		
<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>In natura</i>	-	22,30	Pinto et al. (2017)
	250	30	22,70	

<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>In natura</i>	-	17,45	Arteaga-Pérez et al. (2015)
	250	15	19,50	
	250	30	19,60	
	280	15	20,90	
	280	30	21,00	
<i>Eucalyptus gunnii</i>	<i>In natura</i>	-	19,60	McNamee et al. (2015)
	270	30	23,50	
	290	30	28,50	
<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>In natura</i>	-	19,60	Pohlmann et al. (2014)
	250	30	22,70	
Eucalítpo	<i>In natura</i>	-	18,38	Chen et al. (2014)
	300	60	24,53	
<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>In natura</i>	-	16,49	Yang et al. (2013)
	250	60	19,62	
Eucalítpo	<i>In natura</i>	-	20,60	Chen et al. (2013)
	250	60	21,50	
	275	60	23,90	
	300	60	26,00	
	325	60	26,00	
Eucalítpo	<i>In natura</i>	-	20,50	Ibrahim et al. (2013)
	270	30	22,80	
	270	60	24,30	
	290	30	27,30	

### 2.3.3 Influência da torrefação aos ataques microbiológicos e à lixiviação

Faria et al., (2020) realizaram a torrefação de eucalítpo em um reator de rosca nos tempos de residência de 5, 10, 15 e 20 min. O objetivo do estudo foi analisar o ganho energético e os efeitos em relação a degradação microbiológica e por lixiviação. Para tanto, as biomassas *in natura* e torrificadas foram submetidas à lixiviação e aos fungos de podridão branca e parda, sendo a perda após a etapa de lixiviação, o teor de água e a perda mássica devido à deterioração fúngica registrados após 2, 4, 8, 12 e 16 semanas. Os autores observaram que o aumento no tempo de residência da torrefação melhora a resistência ao apodrecimento das biomassas. O processo de lixiviação com água parece melhorar ligeiramente as três biomassas torrificadas, sendo observada uma diminuição no teor de oxigênio e um aumento no teor de carbono resultando em melhores valores de HHV do que nas biomassas não lixiviadas. E os teores de carbono e os valores de HHV de biomassas *in natura* e torrificadas diminuíram durante a exposição a *Trametes versicolor* (fungo da podridão branca) [49,65% > C > 44,07% e 19,71 kJ.kg<sup>-1</sup> > HHV > 17,19 kJ.kg<sup>-1</sup>], enquanto aumentaram durante exposição a *Coniophora puteana* (fungo da podridão parda) [46,15% < C < 52,70% e 17,43 kJ.kg<sup>-1</sup> < HHV < 20,74 kJ.kg<sup>-1</sup>]. A conclusão dos autores

foi que a torrefação é uma boa forma de melhorar as propriedades energéticas do eucalipto e, concomitantemente, limita a perda de suas propriedades energéticas durante o armazenamento.

Castro et al., (2019) estudaram a resistência de cavacos de madeira de *Eucalyptus urophylla* torreficados aos ataques por fungos xilófagos. A torrefação foi realizada nas temperaturas de 180, 220 e 260 °C por 20 min. Os microrganismos utilizados foram os fungos da podridão branca *Phanerochaete chrysosporium*, *Pleurotus ostreatus* e *Trametes versicolor* e o fungo da podridão parda *Gloeophyllum trabeum*. Os resultados mostraram que, após 12 semanas de exposição, as perdas de massa das amostras de madeira *in natura* e torreficadas a 180 °C atacadas por *Pleurotus ostreatus* e *Trametes versicolor* foram maiores. A torrefação aumentou a resistência aos fungos, sendo o tratamento a 260 °C o mais eficiente com menores perdas de massa causadas pelo ataque de fungos e, conseqüentemente, maior resistência aos fungos testados.

#### **2.3.4 Torrefação na obtenção de produtos de alto valor agregado**

Zheng et al., (2020) empregaram a torrefação seguida de pirólise rápida em resíduos de eucalipto impregnados com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> com o objetivo de converter estes resíduos em produtos químicos com valor agregado. A torrefação foi realizada nas temperaturas de 260, 280, 300 e 320 °C com os tempos de residência de 20, 40, 60, 120, 240 e 360 s, com a pirólise rápida ocorrendo na temperatura de 550 °C com 20 s de tempo de residência. O maior rendimento total de levoglucosan (82,4% com base na celulose) foi obtido no material torreficado a 300 °C por 240 s seguido pela pirólise rápida a 550 °C. Já o maior rendimento total de xilosan (17,0%, com base na hemicelulose) foi obtido a partir da torrefação a 280 °C com um tempo de residência de 20 s seguido pela pirólise rápida a 550 °C. Os autores demonstraram que a impregnação da biomassa em ácido sulfúrico propiciou a conversão de holocelulose em anidro-açúcares por meio da torrefação e, por outro lado, inibiu a degradação da lignina e a formação de gás não condensável e oxigenados leves C1-C4, sendo uma forma simples e eficiente para aumentar o valor agregado do material.

Pinto et al., (2017) estudaram a torrefação e a peletização de eucalipto em temperaturas situadas entre 200-300 °C e nos tempos de residência de 30, 45 e 60 min. Com base nos ensaios, 250 C e 30 min foram selecionados como as melhores

condições para a torrefação. A análise química mostrou que a biomassa torrificada apresentou maiores teores de extrativos totais e de lignina e menores de monossacarídeos em relação a biomassa *in natura*. A biomassa foi também densificada para produzir pellets de matéria-prima e material torrificado, com os materiais obtidos pelos diferentes pré-tratamentos gaseificados em reator de leito fluidizado. O gás de gaseificação obtido para a amostra *in natura* foi comparado com os materiais pré-tratados por peletização (ou densificação), torrefação e torrefação seguida de peletização. Os resultados obtidos mostraram que o biogás de síntese foi melhorado quando se utilizou biomassa torrificada, pois houve aumento no rendimento de gás e CGE (Cold Gas Efficiency) e menor alcatrão foram produzidos. O melhor pré-tratamento para os tocos de eucalipto foi a densificação após a torrefação, pois a 850 °C o rendimento de gás foi de cerca de 1,22 NI g<sup>-1</sup> daf e o CGE foi de cerca de 65%. Este gás de síntese continha cerca de 38% de H<sub>2</sub>, 27% de CO e CO<sub>2</sub> e 5% de CH<sub>4</sub>.

### 2.3.5 Influência da torrefação na moagem

Rousset et al., (2013) estudaram a moagem de cavacos de eucalipto torrificadas em temperaturas variando de 210 °C a 270 °C com tempo de residência de 15 min, em comparação com o material *in natura* antes e após a fluidização. Os testes foram realizados em uma câmara de leito de fluidização a frio com diâmetro interno de 150 mm, com ar como meio de fluidização e altura de câmara de até 750 mm. A moagem da biomassa foi avaliada por meio da mudança na distribuição do tamanho das partículas. Os resultados mostraram que o grau de degradação térmica dependeu da temperatura e foi influenciado pelo tamanho das partículas. O tamanho médio das partículas da biomassa torrificada moída diminuiu com o aumento da temperatura de torrefação.

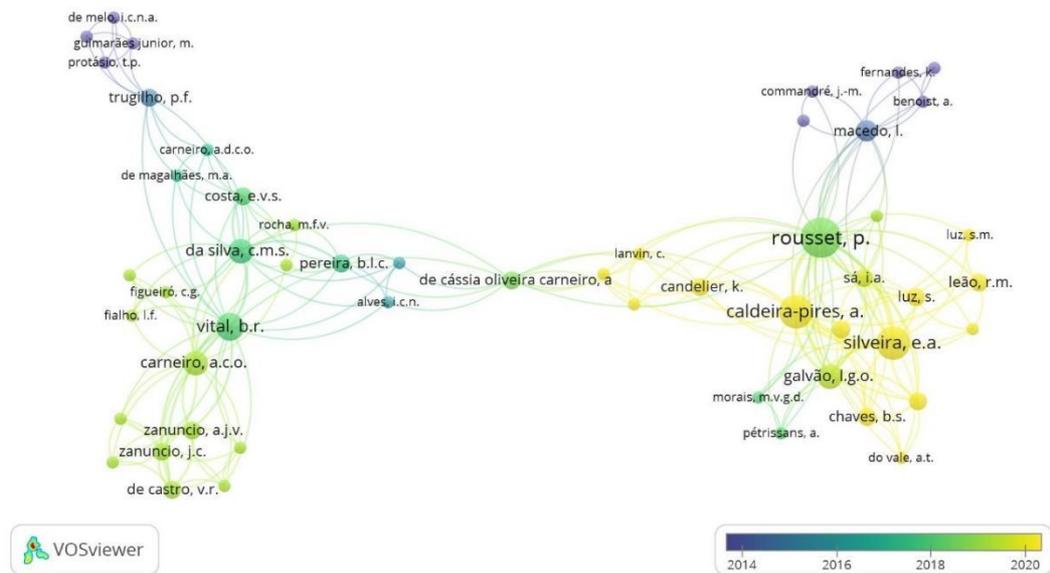
Silva et al., (2017) avaliaram as alterações estruturais e composicionais em cavacos de madeira de eucalipto submetidos ao processo de torrefação. As amostras de aparas de madeira com três teores iniciais de umidade (0, 15 e 30% base seca) foram torradas até três temperaturas finais (220, 260 e 300 ° C) e três tempos de aquecimento (10, 15 e 20 min). O efeito dessas variáveis foi avaliado através da análise da composição química, termogravimetria e durabilidade mecânica dos

cavacos torreficados. Os autores observaram que o aumento da temperatura e do tempo de torrefação, assim como a queda no teor de umidade inicial, promoveram mudanças estruturais e composicionais significativas nos cavacos de madeira. Com a biomassa torreficada apresentando maior resistência à degradação térmica, estrutura mais friável, maior teor lignina e menores teores de polissacarídeos do que as amostras *in natura*. Tais mudanças promoveram um aumento na qualidade dos cavacos de madeira de eucalipto para uso como combustível sólido.

### 2.3.6 Pesquisa bibliométrica

Utilizando os termos “torrefaction Eucalyptus” e o período de 2008-2021 no software VOSviewer foi possível construir a rede bibliométrica disposta na Figura 2-2.

Figura 2-2. Rede bibliométrica referente a trabalhos envolvendo torrefação de eucalipto



Fonte: Autor (2020)

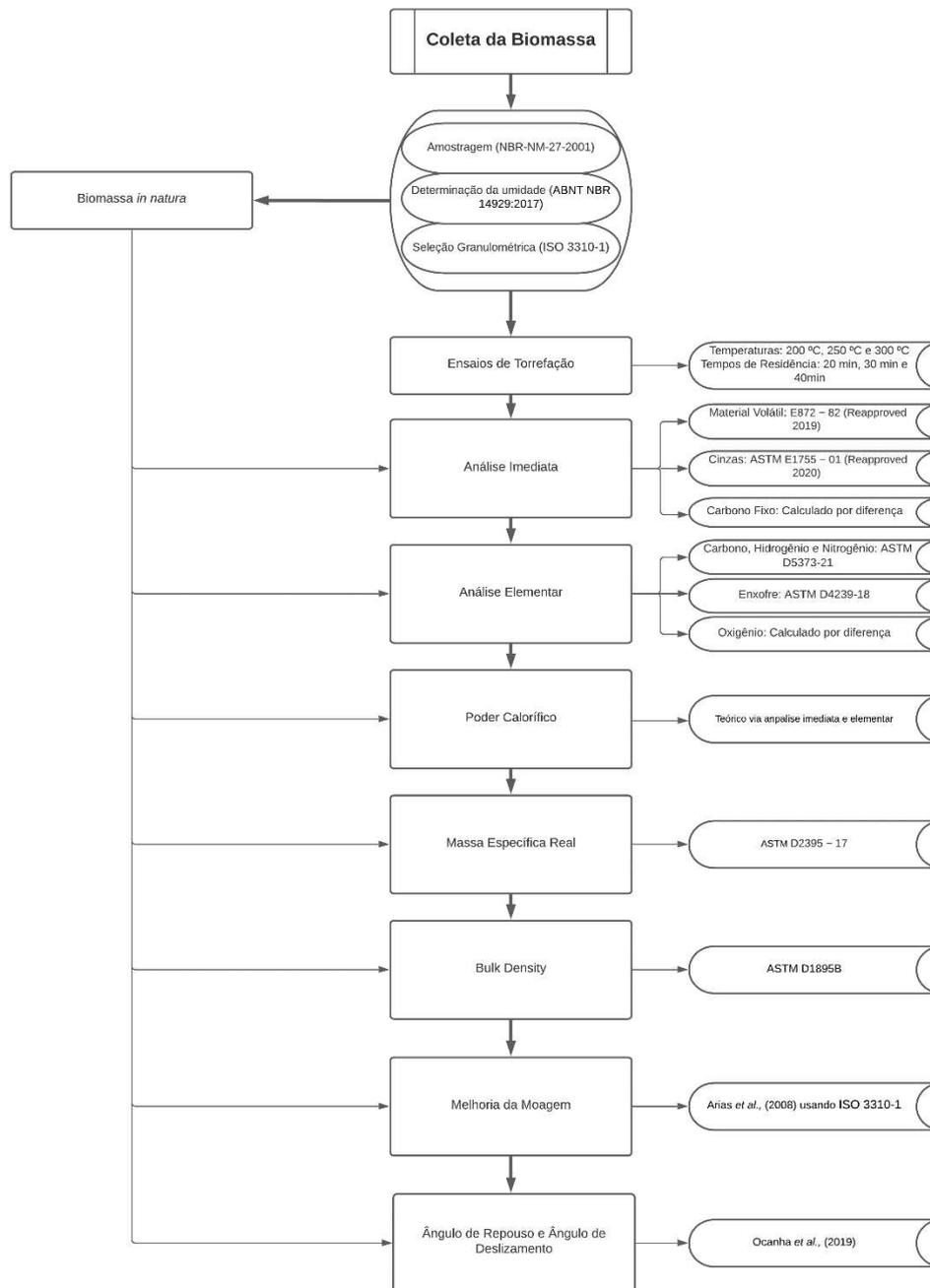
A Figura 2-2 é relativa a rede bibliométrica dos trabalhos revisados envolvendo torrefação de eucalipto. Nela estão representados os autores, o ano das publicações e as conexões existentes entre os trabalhos em relação a citações, com o diâmetro dos círculos que envolvem os nomes dos autores estando diretamente relacionado com a quantidade de citações recebidas.

É possível observar que este nicho de pesquisa está em crescente expansão, com os resultados obtidos pelo VOSviewer permitindo constatar que os trabalhos produzidos após 2018 são os mais relevantes e com maior volume de citações, com destaque central para os autores Rousset, P. (França); Caldeira-Pires A. (Brasil) e Silveira, E.A. (Brasil).

### 3 METODOLOGIA

Na Figura 3-1 está disposto um fluxograma onde consta, de forma resumida, a metodologia utilizada para a realização do presente trabalho.

Figura 3-1. Metodologia aplicada para desenvolvimento do presente estudo



Fonte: Autor (2020)

A biomassa utilizada foi a serragem de *Eucalyptus grandis* coletada na empresa Zomer Móveis, onde a madeira de eucalipto é utilizada na fabricação de móveis e utensílios domésticos. A madeira é oriunda do Horto Florestal São Martinho, localizado no município de Arroio dos Ratos (RS) cujas plantações são colhidas a partir de 18 anos de idade. A biomassa utilizada foi coletada em maio de 2021.

### 3.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade (TU) da biomassa *in natura* foi determinado com base na norma ABNT NBR 14929:2017, que consiste na medição da massa inicial úmida e da posterior medição da massa seca. O material foi seco em estufa a  $103\pm 2$  °C por 24 h, e para medição da massa foi utilizada uma balança analítica com sensibilidade de 0,0001 g. O teor de umidade do material corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, sendo obtido pela Equação 3.1. A análise foi realizada em triplicata.

$$TU = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$TU$  = teor de umidade, em %;

$m_i$  = massa inicial da biomassa, em gramas; e

$m_s$  = massa da biomassa seca, em grama.

### 3.2 Determinação granulométrica

A determinação granulométrica foi realizada por peneiração seguindo a ISO 3310-1. Neste método de análise de dimensões que compõe a amostra, o processo se dá com a utilização de peneiras granulométricas com diferentes tamanhos de aberturas. Os ensaios foram realizados utilizando as aberturas de peneiras dispostas na Tabela 3-1, onde estão dispostas a sequência em que as peneiras foram utilizadas, suas aberturas e diâmetro médio ( $d_i$ ) em mm, a massa de biomassa *in natura* utilizada no ensaio foi de aproximadamente 50 g. O mesmo procedimento foi aplicado posteriormente para determinação da granulometria do material torreficado e do torreficado e moído, sendo todas as análises realizadas em triplicata.

Tabela 3-1. Peneiras utilizadas nos ensaios granulométricos

Peneira (mm)	Abertura (mm)	di (mm)
+9,52	9,52	9,52
-9,52 + 4,75	4,75	7,135
-4,75 + 2,38	2,38	3,565
-2,38 + 1,19	1,19	1,785
-1,19 + 0,6	0,6	0,895
-0,6 + 0,425	0,425	0,5125
-0,425 + 0,25	0,25	0,3375
-0,25	Fundo	0,125

Fonte: Autor (2021)

Os quatro tipos de diâmetros determinados por meio do ensaio granulométrico foram o diâmetro médio linear, que é uma dimensão linear média de toda a amostra, sendo igual à soma de todos os diâmetros das partículas dividida pelo total de diâmetros. A Equação 3.2 foi utilizada para obtenção deste diâmetro.

$$D_{pL} = \frac{\sum \frac{x_i}{D_i^2}}{\sum \frac{x_i}{D_i^3}} \quad (3.2)$$

Onde:

$D_{pL}$ : Diâmetro médio linear;

$x_i$ : Fração mássica retida na peneira; e

$D_i$ : Diâmetro médio entre as peneiras.

O diâmetro médio areolar, que fornece a dimensão de uma partícula cuja área é a média da área de todas as partículas na amostra, e foi calculado por meio da Equação 3.3.

$$D_{pA} = \sqrt{\frac{\sum \frac{x_i}{D_i}}{\sum \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (3.3)$$

Onde:

$D_{pA}$ : Diâmetro médio areolar;

$x_i$ : Fração mássica retida na peneira; e

$D_i$ : Diâmetro médio entre as peneiras.

O diâmetro médio volumar, que dá a dimensão de uma partícula cujo volume é a média dos volumes de todas as partículas na amostra.

$$D_{pV} = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (3.4)$$

Onde:

$D_{pV}$ : Diâmetro médio volumar;

$x_i$ : Fração mássica retida na peneira; e

$D_i$ : Diâmetro médio entre as peneiras.

E o diâmetro médio de Sauter, calculado por meio da Equação 3.5, que é a dimensão média de maior utilização, sendo o diâmetro médio de uma partícula que tem o volume médio por unidade de superfície entre as partículas da amostra podendo ser obtido pela medição direta do volume e da área da amostra inteira seguido pela divisão de um pelo outro, determinado usualmente por uma análise granulométrica aplicado a todos os casos em que a área superficial por unidade de volume da fase sólida é importante.

$$D_{pSauter} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{D_i}} \quad (3.5)$$

Onde:

$D_{pSauter}$ : Diâmetro médio de Sauter;

$x_i$ : Fração mássica retida na peneira; e

$D_i$ : Diâmetro médio entre as peneiras.

### 3.3 Ensaios de torrefação

A torrefação foi realizada em um reator da Marca Sanchis Fornos Industriais do modelo mufla tubular, disposto na Figura 3-2 com termopar do tipo K, 4 kW de potência e temperatura máxima de 1200 °C.

Figura 3-2. Reator utilizado para realização dos ensaios de torrefação



Fonte: Autor (2021)

Partindo dos trabalhos revisados, se optou por utilizar as temperaturas de 200, 250 e 300 °C para os ensaios de torrefação. Como observado por Pereira *et al.* (2016), que estudou a torrefação de cavacos de eucalipto, temperaturas inferiores a 200 °C para esta biomassa lenhosa não foram adequadas ao processo. Também de acordo com Arias *et al.* (2008), que aplicaram as temperaturas de 240, 260 e 280 °C e observaram que a temperatura de 240 °C foi a que compensou a perda de massa, propiciando melhoria na moagem e manuseio da biomassa, com a moagem sendo uma característica de interesse no presente estudo.

Uma quantidade de aproximadamente 50 g da biomassa *in natura* foi disposta numa embalagem de alumínio com 500 mL de capacidade volumétrica. A biomassa era então tampada com papel alumínio e introduzida no reator. Inicialmente, a medição da temperatura da biomassa foi realizada pelo termômetro do próprio reator, com uma pequena perfuração na embalagem permitindo que a ponta do sensor fosse

introduzida no interior da biomassa. Entretanto, esta metodologia se mostrou como não adequada, uma vez que o sensor de temperatura introduzido no interior do material fazia com que a resistência do equipamento ficasse ligada por um tempo muito superior ao necessário para atingir as temperaturas alvo, impossibilitando que as temperaturas de 200 °C, 250 °C e 300 °C fossem estabilizadas, que era o que se buscava. Assim, a saída encontrada foi introduzir um termômetro externo, com sua ponta disposta no interior da biomassa, e realizar o controle manual da temperatura no reator, desligando a resistência após a temperatura alvo ser atingida, e ligando novamente quando iniciasse a queda da temperatura. Essa abordagem foi aplicada pois o controle de temperatura do próprio equipamento apresentava grandes variações entre as temperaturas máximas e mínimas para os valores setados, com a atuação do controle manual se mostrando satisfatória e capaz de manter as temperaturas alvo no interior da biomassa com uma mínima variação.

Os níveis de tempo de residência escolhidos foram escolhidos de acordo com o trabalho de De Faria et al. (2020), onde 15 min de torrefação foram suficientes para produzir melhorias energéticas na biomassa, e no trabalho de Onsree e Tippayawong (2020), onde após aproximadamente 30 min para a condição mais amena estudada (220 °C) foi verificada a estabilização dos rendimentos sólidos em função do tempo de residência. É importante destacar que, no presente trabalho, o tempo de residência foi contabilizado somente após o interior da biomassa atingir a temperatura alvo.

Assim, foi realizado um Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado (DIC), em arranjo fatorial do tipo 3 x 3, com triplicatas para cada combinação de três temperaturas (200 °C, 250 °C e 300 °C) e três tempos de residência (20 min, 30 min e 40 min) de tratamento, como consta na Tabela 3-2.

Tabela 3-2. Delineamento experimental para os ensaios de torrefação

Teste	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Variável analisada
1	200	20	RG, RE e PCS
2	200	30	
3	200	40	
4	250	20	
5	250	30	
6	250	40	
7	300	20	

8	300	30	
9	300	40	

Fonte: Autor (2021)

Após a torrefação, o material foi analisado quanto ao seu Rendimento Gravimétrico (RG), Rendimento Energético (RE) e Poder Calorífico Superior (PCS).

O RG é relativo à quantidade de sólido que permaneceu após a torrefação, sendo calculado segundo a Equação 3.6.

$$RG = \frac{M_{tor}}{M_i} \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

$M_{tor}$  = Massa da amostra após a torrefação (g); e

$M_i$  = Massa da amostra *in natura* antes da torrefação.

O RE avaliou a quantidade de energia que permaneceu no material, não sendo perdida no decorrer do processo na massa volatilizada. Este rendimento foi calculado a partir da relação entre o produto da massa pelo Poder Calorífico Superior com os valores da biomassa *in natura* e torrificada, como exposto na Equação 3.7.

$$RE = \frac{M_{tor} \times PCS_{tor}}{M_i \times PCS_i} \times 100 \quad (3.7)$$

Sendo:

$M_{tor}$  = A massa da amostra após a torrefação;

$PCS_{tor}$  = O PCS da amostra após a torrefação;

$M_i$  = A massa inicial da amostra; e

$PCS_i$  = O PCS inicial da amostra.

### 3.4 Análise Imediata

A Tabela 3-3 é referente as normas aplicadas para determinação da análise imediata. A análise imediata das amostras é responsável pela determinação, em porcentagem de massa ou volume, de carbono fixo, matéria volátil, cinzas e umidade, foi utilizada a norma ASTM E872-82 para determinação do material volátil, assim como realizado por Rashid et al. (2019), Guimarães (2016), Klaas et al. (2020) Ozonoh et

al. (2020) e Silva (2015). As cinzas foram determinadas por meio da norma ASTM D1102, como concretizado por Guimarães (2016), Da Silva et al. (2020), Klaas et al. (2020) e Ozonoh et al. (2020). Com o teor de carbono fixo sendo determinado por diferença.

Tabela 3-3. Normas utilizadas para determinação da análise imediata

Componente	Norma
Cinzas	ASTM E1755-01
Material Volátil	ASTM E872-82
Carbono Fixo	Calculado por diferença

Para o teor de materiais voláteis, tanto da biomassa *in natura* quanto da torrificada, o tratamento foi o que segue: três cadinhos de porcelana de 50 mL foram secos em mufla a 575 °C por 3 horas, sendo em seguida resfriados em dessecador e tendo suas massas medidas em balança analítica. Uma amostra de 1 g livre de umidade foi disposta nos cadinhos, que foram tampados e levados a mufla aquecida até 950 °C, permanecendo por exatos 7 minutos. Após os cadinhos foram levados ao dessecador por uma hora e posteriormente tiveram suas massas finais determinadas.

O teor de materiais voláteis (MV) foi determinado através da Equação 3.8.

$$MV = \frac{m_{a+cad} - m_{f+cad}}{m_{a+cad} - m_{cad}} * 100\% \quad (3.8)$$

Onde:

$m_{a+cad}$  = massa inicial amostra+cadinho;

$m_{f+cad}$  = massa final amostra+ cadinho; e

$m_{cad}$  = massa cadinho.

Para a determinação do teor de cinzas, os mesmos três cadinhos de porcelana, livres de voláteis e agora destampados, foram inseridos simultaneamente no centro da mufla por 4 horas na temperatura de 575 °C. Em seguida as amostras foram

levadas ao dessecador para resfriar por duas horas e ter sua massa quantificada. Como forma de garantir que todo o material estivesse queimado, os cadinhos foram levados a mufla por mais 1 h a 575 °C. Em seguida, foram novamente resfriados no dessecador por duas horas e então tiveram suas massas medidas. O teor de cinzas (CZ) foi calculado de acordo com a Equação 3.9.

$$CZ = \frac{m'_{f+cad} - m_{cad}}{m_{a+cad} - m_{cad}} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

Onde:

$m_{a+cad}$  = massa inicial amostra+cadinho;

$m'_{f+cad}$  = massa final amostra+ cadinho; e

$m_{cad}$  = massa cadinho.

O teor de carbono fixo (CF) da amostra será obtido pela diferença entre os teores de materiais voláteis e cinzas através da Equação 3.10.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (3.10)$$

### 3.5 Análise elementar

As análises elementares para carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e cloro foram determinadas a partir das normas ASTM D-3176[76] e ASTM E 777, E 775 e E 778. A fração de oxigênio foi determinada por diferença.

Além da determinação por via experimental, foi aplicado o método de predição de carbono, oxigênio e hidrogênio proposto por Nhuchhen (2016), onde é realizada uma correlação entre os dados obtidos na análise imediata fazendo uso das Equações 3.11, 3.12 e 3.13.

$$C = 1,0396 * CF + 0,0757 * MV^{1,3773} \quad (3.11)$$

$$H = 55,3678 - 0,4830 * MV - 0,5319 * CF - 0,5600 * CZ \quad (3.12)$$

$$O = -0,0198 * CF + 0,7244 * MV^{0,939} \quad (3.13)$$

### 3.6 Poder Calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio da análise imediata utilizando as Equações 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17, propostas por:

Nhuchhen e Salam (2012):

$$PCS (MJ kg^{-1}) = 19,2880 - 0,2135 \left(\frac{MV}{CF}\right) + 0,0234 \left(\frac{CF}{CZ}\right) - 1,9584 \left(\frac{CZ}{MV}\right) \quad (3.14)$$

Demirbas et al., (1997):

$$PCS (MJ kg^{-1}) = 0,196(CF) + 14,119 \quad (3.15)$$

Parikh, Channiwala e Ghosal (2005):

$$PCS (MJ kg^{-1}) = 0,3536(CF) + 0,1559(MV) - 0,0078(CZ) \quad (3.16)$$

Cordero et al. (2001)

$$PCS (MJ kg^{-1}) = 0,3543(CF) + 0,1708(MV) \quad (3.17)$$

E por meio da análise elementar, aplicando as Equações 3.8, 3.19 e 3.20 obtidas nos trabalhos de:

Sheng e Azevedo (2005):

$$PCS(MJ kg^{-1}) = -1,3675 + 0,3137 * C + 0,7009 * H + 0,0318 * O \quad (3.18)$$

Boie (1950):

$$PCS(kcal kg^{-1}) = 83,2 * C + 224,2 * H + 25 * S + 15 * N - 25,8 * O \quad (3.19)$$

Lloyd-Davenport (1980):

$$PCS(kJ kg^{-1}) = 357,77 * C + 917,58 * H - 84,51 * O - 59,38 * N + 111,87 * S \quad (3.20)$$

### 3.7 Determinação da Massa Específica Real

Para a determinação da massa específica real foi realizada para a amostra *in natura* com um diâmetro médio de Sauter de 2,35 mm. O ensaio foi efetuado por meio de picnômetro a gás de Hélio. Se trata de um equipamento que opera por meio de duas câmaras diferentes, onde em uma é inserida a amostra e na outra é aplicada a referência.

Uma massa de 3 g foi submetida a purgas de gás hélio para eliminação do ar existente na amostra, sendo então realizadas as medições. A medida foi baseada na diferença de pressão entre o volume de referência e o volume da célula preenchida com a amostra por meio da Equação 3.21.

$$V_p = V_c - V_R \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (3.21)$$

Sendo:

$V_p$  = Volume ocupado pelo sólido;

$V_c$  = Volume da célula do equipamento;

$V_R$  = Volume de referência;

$P_1$  = Pressão após a pressurização da célula; e

$P_2$  = Pressão após a conexão da célula de referência com a célula que contém a amostra.

Com o volume ocupado pelo sólido ( $V_p$ ) definido, foi possível determinar a massa específica real ( $\rho_R$ ) a partir da Equação 3.22.

$$\rho_R = \frac{m_i}{V_p} \quad (3.22)$$

### 3.8 Determinação da massa específica aparente e de leito

Baseado no trabalho de Farias (2012) e Santomaso et al., (2003), a massa específica de leito (bulk density) foi determinada por meio do método de compactação da biomassa, utilizando uma proveta de 25 ml e uma balança analítica de 0,0001 g de precisão.

Uma alíquota de aproximadamente 2 g foi inserida no interior da proveta, e a compactação foi realizada de forma manual, com batidas executadas mecanicamente sobre uma superfície rígida, sem ultrapassar 20 cm de deslocamento. O procedimento foi executado até não ocorrer mais alteração no volume interno do recipiente. Os ensaios foram realizados em triplicata.

A massa específica aparente foi determinada utilizando a proveta de 25 ml e balança analítica de 0,0001 g de precisão, mas sem ser efetuada a compactação do material no interior do recipiente. Sendo calculada através da Equação 3.23.

$$\rho_{LA} = \frac{M_{solta}}{V_{cilindro}} \quad (3.23)$$

Sendo:

$\rho_{LA}$  = Massa específica de leito aerada;

$M_{solta}$  = Massa de biomassa no interior do recipiente antes da compactação; e

$V_{cilindro}$  = Volume do cilindro.

E a massa específica de leito foi calculada através da Equação 3.24.

$$\rho_{LC} = \frac{M_{compactado}}{V_{cilindro}} \quad (3.24)$$

Sendo:

$\rho_{LC}$  = Massa específica de leito compactado;

$M_{compactado}$  = Massa de biomassa no interior do recipiente após a compactação; e

$V_{cilindro}$  = Volume do cilindro.

### 3.9 Determinação da melhoria da moagem

Seguindo os trabalhos de Arias *et al.*, (2008) e Romão e Dias (2018), as amostras da biomassa torrificada e da amostra *in natura* foram moídas em um moedor de baixa rotação (3500 rpm) da marca Becker por 30 s. Posteriormente, foi realizado o ensaio granulométrico com o objetivo de determinar a influência da torrefação na facilidade em se obter um produto com menor granulometria.

Para determinação da granulometria foi realizado o peneiramento das amostras utilizando a mesma faixa de peneiras aplicadas para a amostra *in natura*, como consta na Tabela 3-1. Uma massa de aproximadamente 10 g de material torrificado foi utilizada em cada ensaio. Os ensaios foram realizados em triplicata.

### 3.10 Ângulo de repouso

Os ângulos de repouso da biomassa *in natura* e do material torrificado foi realizado por meio do escoamento por um funil, como exemplificado na Figura 3-3. O ângulo gerado foi determinado por meio do Software ImageJ.

Figura 3-3. Aparato utilizado para determinação do ângulo de repouso



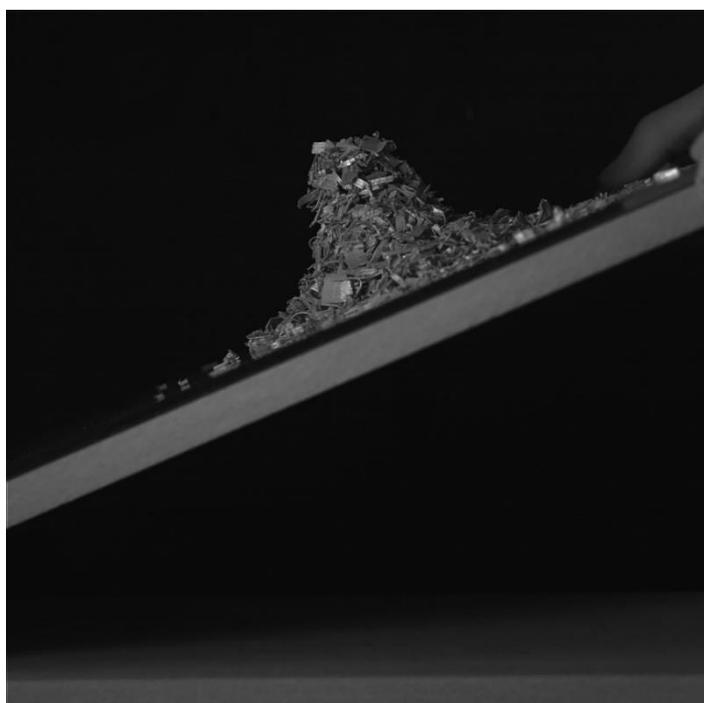
Fonte: Autor (2020)

### 3.11 Teste de Plano Inclinado

Para obtenção do coeficiente de atrito estático partícula-parede, foi utilizado um aparato desenvolvido para este teste, consistindo em uma superfície de acrílico

inclinável de dimensões 400x300 mm, sobre a qual a biomassa *in natura* e torrificada eram depositadas formando uma pilha, com o ângulo necessário para que a pilha começasse a deslizar sendo determinado por meio do Software ImageJ e as imagens obtidas por meio da câmera de alta velocidade da marca IDT, modelo Motion Pro Y4, realizando 500 imagens por segundo durante 6 segundos. Conforme a placa é inclinada, a força de atrito precisa ser suficiente para balancear a força peso decomposta naquela direção. Ao aumentar o ângulo, o componente gravidade excede o valor máximo da força de atrito e a partícula desliza, com o ângulo de atrito estático partícula-parede sendo obtido diretamente do experimento.

Figura 3-4. Prancha utilizada para determinação do ângulo de deslizamento



Fonte: Autor (2020)

### 3.12 Análise Estatística

Os dados relativos das triplicatas que geraram os valores de Rendimento Gravimétrico, Rendimento Energético, Umidade Relativa, Análise Imediata, Massa Específica Aparente, Massa Específica de Leito, PCS, Ângulo de Repouso, Ângulo de Deslizamento e Velocidade de Escoamento foram sumarizados por meio de sua média, desvio padrão e coeficiente de variação. O Coeficiente de Variação (CV), calculado por meio da Equação 3.25, foi utilizado para a verificação da qualidade e

reprodutibilidade das médias das triplicatas realizadas, sendo o coeficiente de variação (CV) um parâmetro de referência da homogeneidade dos dados em relação à média ( $x$ ) e desvio padrão (S).

$$CV(\%) = \frac{S}{x} 100 \quad (3.25)$$

Onde:

CV = coeficiente de variação;

S = desvio padrão; e

$x$  = média.

No presente estudo, dados com CV abaixo de 10% foram considerados como de baixa dispersão; entre 10-20% média dispersão; e acima de 30% alta dispersão.

Para determinar se ocorreu variação significativa entre os valores de Rendimento Gravimétrico, Rendimento Energético e PCS entre as temperaturas e tempos de residência aplicados nos ensaios de torrefação, também foram realizados os testes One-Way ANOVA e Kruskal-Wallis por meio do Software Past versão 4.03.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Umidade relativa da biomassa *in natura*

A determinação da umidade foi realizada em quatro ocasiões diferentes, sempre em triplicata, e o resultado médio obtido foi de  $10,85 \pm 0,16\%$ .

A torrefação foi realizada com o material nestas condições, não sendo realizada uma etapa de secagem previamente, com o intuito de concretizar o tratamento térmico em condições mais próximas possíveis da forma como foi obtida na indústria moveleira.

### 4.2 Distribuição granulométrica do material *in natura*

O material *in natura* utilizado nos ensaios de torrefação possuía um diâmetro médio de Sauter igual a 2,35 mm. Os valores de diâmetro médio linear, diâmetro médio areolar, diâmetro médio volumar deste material estão presentes na Tabela 4-1. A Figura 4-1 é relativa à fração mássica retida entre as peneiras utilizadas no ensaio granulométrico, onde é possível verificar que, antes de passar por qualquer tipo de processamento, sendo a biomassa apenas seca a 100 °C por 24 h, os diâmetros de abertura das peneiras onde o material ficou mais retido foram de 3,565 mm e 1,785 mm.

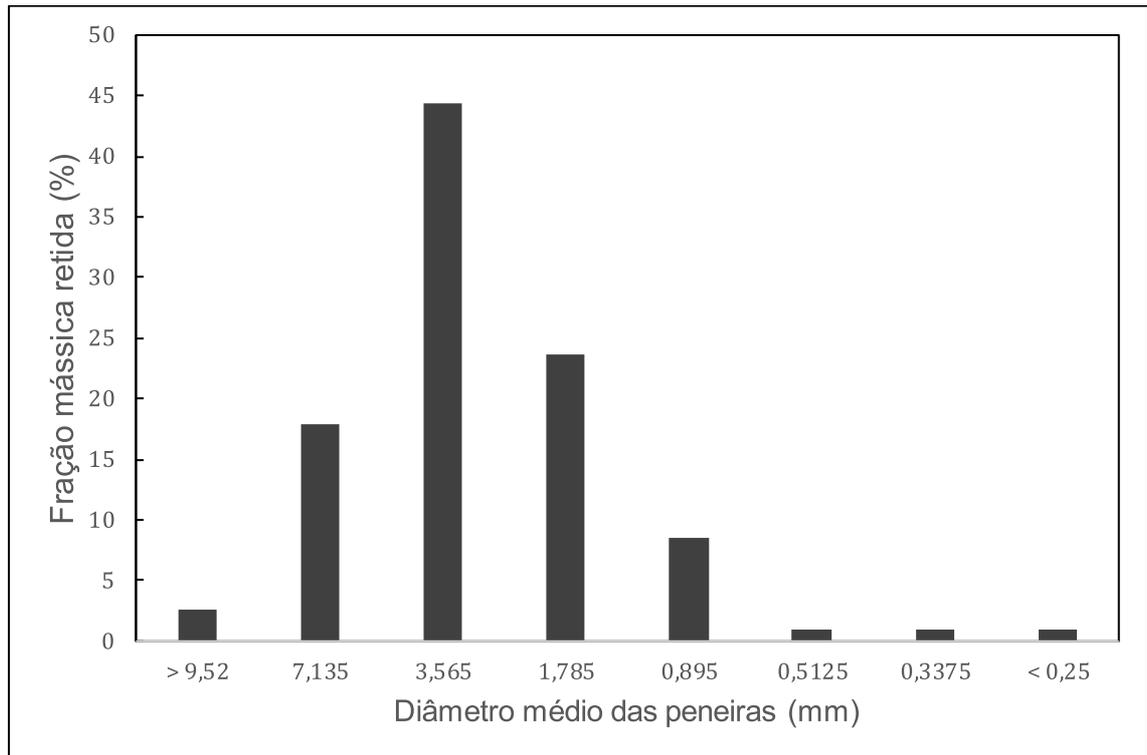
Pensando em alterar o mínimo possível das características do material, foi este o tamanho de partícula utilizado nos ensaios de torrefação, não sendo realizado nenhum tipo de pré-tratamento na biomassa *in natura*.

Tabela 4-1. Diâmetros médios da biomassa *in natura*

Diâmetro Médio Linear (mm)	0,69
Diâmetro Médio Areolar (mm)	0,43
Diâmetro Médio Volumar (mm)	0,68
Diâmetro Médio Sauter (mm)	2,35

Fonte: Autor (2020)

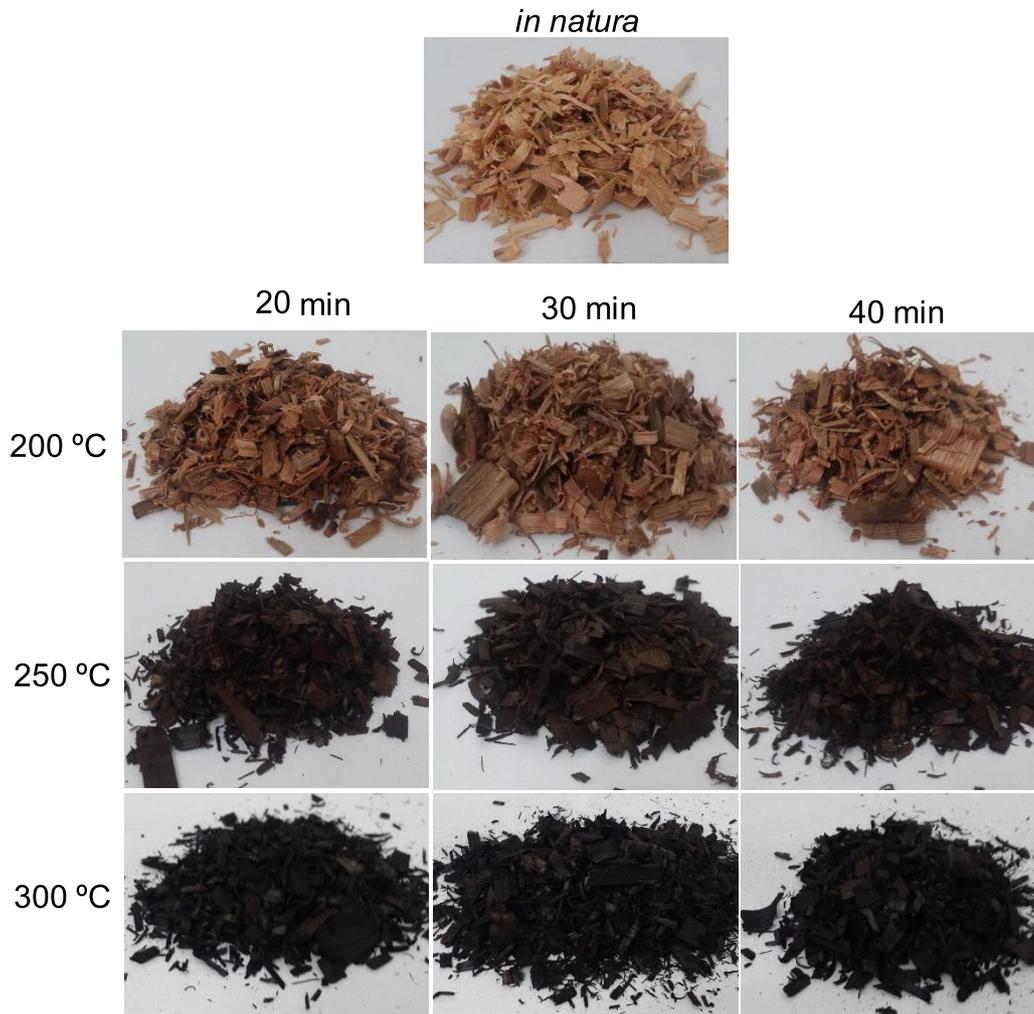
Figura 4-1. Distribuição granulométrica para a biomassa in natura



Fonte: Autor (2020)

### 4.3 Ensaios de torrefação

Na Figura 4-2 são apresentados os resultados da torrefação da serragem de *Eucalyptus grandis* nas diferentes temperaturas analisadas. Observa-se que ocorreu uma variação gradual na coloração das amostras em função da temperatura do processo, com uma coloração mais escura sendo atingida na condição de 300 °C. Isto ocorre, pois, ao ser fornecido calor para a biomassa se verifica, além da desidratação até 100 °C (pois a biomassa *in natura* possuía uma umidade de aproximadamente 10%), a despolimerização das hemiceluloses com a devolatilização ocorrendo na faixa de temperatura entre 200 °C e 300 °C, com diferentes tipos de voláteis sendo decompostos em função da temperatura do processo. Como se verifica na Figura 4-2, a devolatilização foi mais acentuada a partir de 250 °C, onde se constata um maior escurecimento da biomassa.

Figura 4-2. Biomassa de *Eucalyptus grandis* *in natura* e torrificada

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 4-2 estão os dados referentes aos ensaios de torrefação realizados. O controle da temperatura foi feito de forma manual, ocorrendo pequenas variações entre  $T_{\min}$  e  $T_{\max}$  nos ensaios.

O primeiro ponto a ser observado é que, apesar do controle para manter as temperaturas nas faixas desejadas ter sido realizado de forma manual, foi possível obter temperaturas médias ( $T_{\text{med}}$ ) próximas das temperaturas alvo (200, 250 e 300 °C), com uma maior diferença para a temperatura de 300 °C, onde as  $T_{\text{med}}$  ficaram situadas em 295 °C. Também é possível observar que existe uma baixa variação nos resultados obtidos a partir das triplicatas realizadas, com coeficiente de variação abaixo de 10% indicando que a precisão experimental foi adequada, atingindo homogeneidade das variâncias.

Tabela 4-2. Dados dos ensaios de torrefação realizados

Amostra (°C min)	m <sub>i</sub> (g)	t para T alvo (min)	m <sub>f</sub> (g)	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>med</sub> (°C)	RG (%)
200.20	50,2793	8,77	43,5639	198	203	200	86,6±0,06 (0,067)
200.30	50,6255	9,98	43,7739	198	203	201	86,5±0,57 (0,663)
200.40	50,4727	10,72	43,4845	199	203	201	86,2±0,28 (0,329)
250.20	50,4515	15,96	40,2611	248	254	251	79,8±1,88 (2,358)
250.30	50,3595	13,83	39,9615	248	255	252	79,4±0,82 (1,027)
250.40	50,3850	16,47	39,5879	247	254	251	78,6±0,74 (0,945)
300.20	50,2729	20,32	30,1795	292	298	295	60,0±2,11 (3,519)
300.30	50,4161	17,77	29,1313	291	298	294	57,8±3,68 (6,362)
300.40	50,2787	18,43	28,7239	292	298	295	57,1±1,98 (3,473)

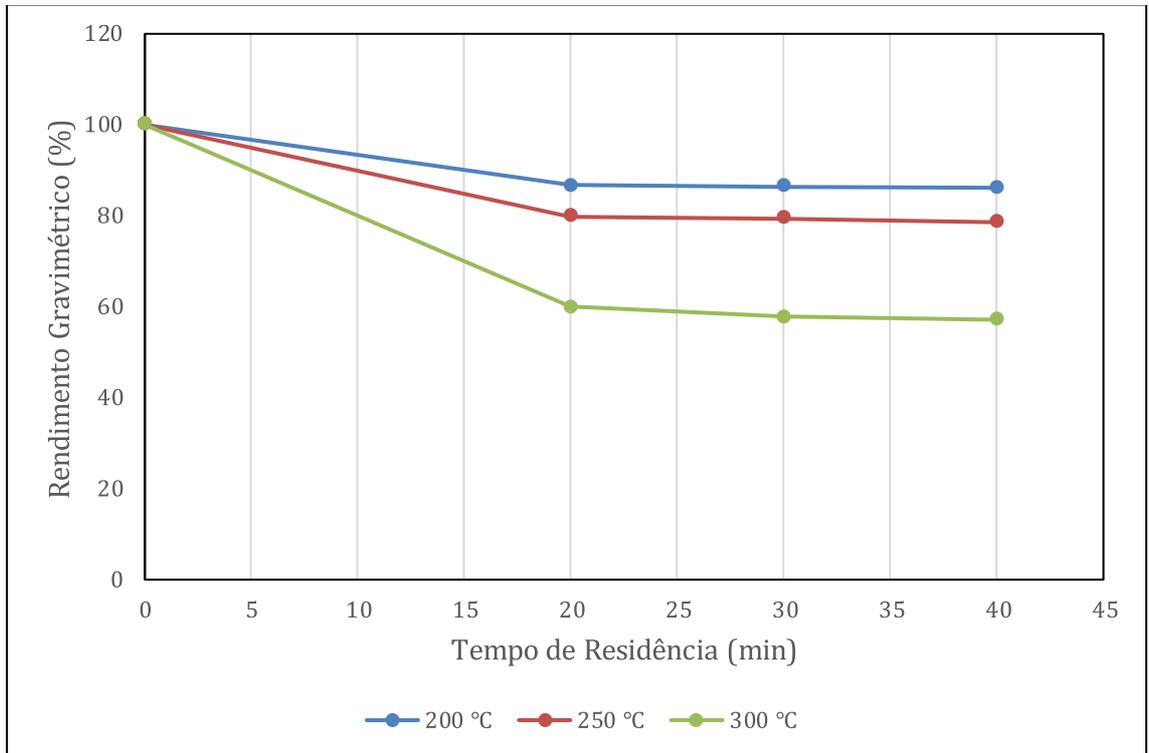
Fonte: Autor (2021). (Os dados de RG são seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Em relação ao tempo necessário para atingir a temperatura alvo no interior das amostras, foi verificado que não ocorreu diferença significativa entre cada um dos pontos analisados. Com a linearização dos tempos necessários para atingir a temperatura alvo entre as diferentes temperaturas estudadas apresentando um  $R^2=0,8562$ .

A perda de massa observada é oriunda da decomposição térmica da biomassa em produtos voláteis como H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, metano, ácido acético e outros compostos orgânicos (Benavente e Fullana, 2015). Assim como relatado por Cardona et al. (2019) e Arteaga-Perez et al. (2015), se verifica que o Rendimento Gravimétrico (RG) diminui em função do aumento da temperatura, sendo de 86,6% na condição de 200 °C-20 min e 60,0% para a condição de 300 °C-20 min. A correlação entre a temperatura de torrefação e o RG foi forte, com  $R^2=0,91$ .

A Figura 4-3 é referente ao RG obtido para cada ensaio. Assim como relatado por Cardona et al. (2019), a temperatura foi um fator de maior relevância para a alteração deste parâmetro, não existindo variação significativa entre os tempos de residência de 20, 30 e 40 min, indicando que 20 min de torrefação para as condições do presente estudo fossem suficientes para provocar a redução mássica na biomassa advindas do processo de torrefação.

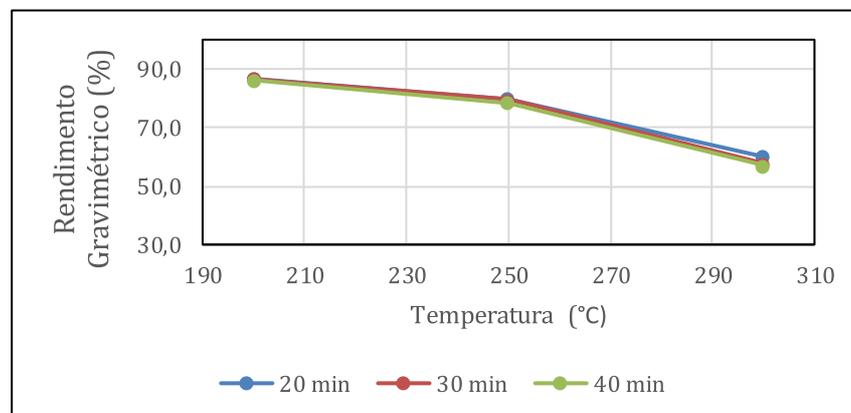
Figura 4-3. RG em função do tempo de residência para cada uma das temperaturas estudadas



Fonte: Autor (2021)

A Figura 4-4 ilustra quão mínima foi a variação do RG em função do tempo de residência, deixando claro que a temperatura do processo de torrefação é o fator com maior influência na modificação das características da biomassa.

Figura 4-4. Variação do RG para os diferentes tempos de residência estudados

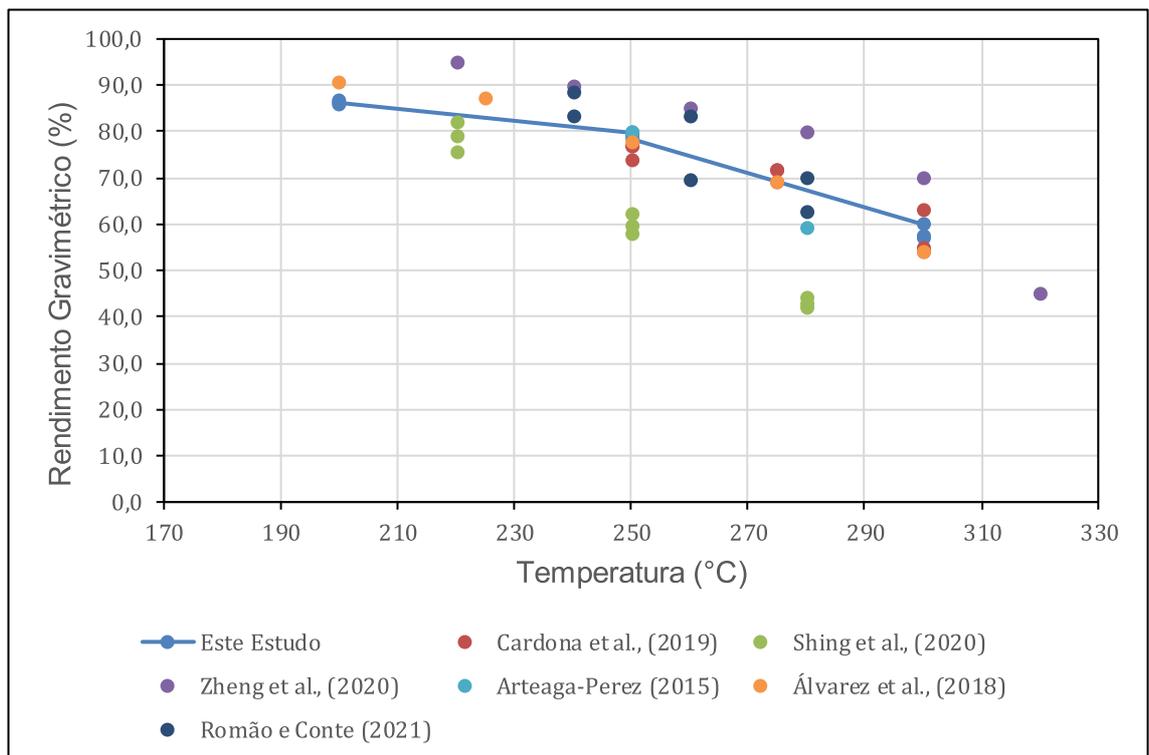


Fonte: Autor (2021)

Os valores para o rendimento mássico encontrados no presente estudo foram muito próximos aos relatados por Cardona et al., (2019), que também aplicaram resíduos de eucalipto no processo de torrefação. O trabalho de Alvarez et al., (2018) também apresentou grande proximidade com o presente estudo em relação ao RM em função da temperatura, como pode ser observado na Figura 4-5.

É importante destacar que, no presente estudo, o tempo de residência foi contabilizado após a biomassa atingir as temperaturas alvo de 200 °C, 250 °C e 300 °C, com o tempo necessário para atingir estas temperaturas também contabilizado, como pode ser observado na Tabela 4-2. Este tipo de informação é algo que muitas vezes foi omitida ou não bem descrita nos trabalhos revisados, cujos RG constam na Figura 4-5, podendo o tipo de metodologia empregada estar relacionada com as variações em relação aos rendimentos gravimétricos observados.

Figura 4-5. Rendimentos Gravimétricos obtidos neste trabalho em comparação com a literatura



Fonte: Autor (2021)

Diferente dos trabalhos de Shing et al., (2020) e Romão e Conte (2021), que também realizaram ensaios de torrefação com biomassa de eucalipto, o presente estudo não observou uma variação significativa no RG em função do tempo de

residência. Entretanto, este comportamento foi relatado por Cardona et al., (2019), que também fez uso de biomassa com aproximadamente 10% de teor de umidade no processo de torrefação, assim como neste estudo, sendo um indicativo de que a umidade inicial do material pode estar atrelada neste tipo de comportamento.

#### 4.4 Análise Imediata biomassa *in natura*

Para o material *in natura*, os valores de carbono fixo, voláteis e cinzas obtidos por meio da análise imediata são os que constam na Tabela 4-3.

Tabela 4-3. Análise imediata realizada em base seca

<b>Análise</b>	<b>Teores (%-m) base seca</b>
Material Volátil	86,56±0,27 (0,31)
Carbono Fixo	13,33±0,27 (6,73)
Cinzas	0,11±0,01 (2,05)

Fonte: Autor (2021). (valores % seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

O coeficiente de variação ficou abaixo de 10% para todas as triplicatas realizadas, indicando uma boa precisão experimental.

Os valores da análise imediata foram correspondentes aos obtidos por Cunha (2021), que utilizou serragem de eucalipto também oriunda de indústria moveleira e relatou a composição de 87,1% para voláteis, 12,8% para carbono fixo e 0,06 para cinzas.

Em relação ao trabalho de Da Silva et al. (2020), que utilizaram resíduos de eucalipto em seu estudo, o valor de voláteis (82,7%) foi levemente inferior ao obtido neste trabalho, enquanto o carbono fixo (15,7%) e cinzas (1,6%) estavam presentes em maiores quantidades. Já o trabalho de Silveira et al. (2021), que fez uso de biomassa oriunda de *Eucalyptus grandis*, constatou uma maior quantidade de carbono fixo (19,02%), enquanto o valor de cinzas foi de 0,08% e de voláteis 80,9%. Vários fatores podem influenciar as variações na composição imediata da biomassa, entre eles o local e a forma de cultivo, mas de uma forma geral o que se verifica é que a composição das biomassas apresenta altos valores de voláteis e poucas cinzas.

#### 4.5 Análise imediata biomassa torrificada

Para o material torrificado, os valores obtidos para a análise imediata são os que constam na Tabela 4-4.

Tabela 4-4. Análise imediata biomassa torrificada

Amostra (°C min)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
200.20	86,20±0,33 (0,39)	13,69±0,35 (2,53)	0,12±0,01 (12,7)
200.30	86,08±0,33 (0,38)	14,16±0,35 (2,55)	0,13±0,01 (12,5)
200.40	86,50±0,34 (0,39)	13,28±0,23 (1,72)	0,22±0,01 (6,30)
250.20	83,06±1,50 (1,80)	16,81±1,49 (8,87)	0,13±0,01 (6,94)
250.30	83,12±0,24 (0,29)	16,72±0,24 (1,44)	0,16±0,01 (6,39)
250.40	83,51±0,59 (0,71)	16,29±0,61 (3,74)	0,20±0,02 (9,37)
300.20	72,00±2,21 (3,07)	27,82±2,19 (7,87)	0,18±0,02 (14,3)
300.30	70,24±2,80 (3,99)	29,61±2,81 (9,48)	0,15±0,02 (12,0)
300.40	68,59±3,55 (5,18)	31,19±3,56 (11,4)	0,22±0,00 (1,96)

Fonte: Autor (2021). (valores % seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Em relação ao coeficiente de variação, quatro pontos nos valores das cinzas e um ponto no valor de carbono fixo apresentaram valores acima de 10%, indicando uma média dispersão. Para os demais pontos, os valores ficaram abaixo de 10%, demonstrando uma baixa dispersão e uma boa precisão experimental.

De forma geral, foi verificado que a torrefação reduziu de forma significativa a quantidade de voláteis presentes no material a partir da temperatura de 250 °C, sendo mais incisiva na temperatura de 300 °C, onde a quantidade de carbono fixo dobrou em relação a biomassa *in natura*. Para a temperatura de 250 °C os valores de carbono fixo foram acrescidos em aproximadamente 3% em relação a biomassa *in natura*, com a variação de cinza sendo pouco significativa. Já a temperatura de 200 °C, em todos os tempos de residência analisados, não apresentou variação significativa quando comparado com os valores da biomassa *in natura*.

O tempo de residência não influenciou na composição imediata, não sendo constatadas variações significativas para as temperaturas de 200 °C e 250 °C, ou seja, 20 min nestas condições seriam suficientes para provocar as alterações no material. Já para a temperatura de 300 °C ocorreu um acréscimo de 3,37 para o teor de carbono fixo no tempo de residência de 40 min em relação ao tempo de residência de 20 min, com o comportamento inverso sendo verificado para o teor de voláteis, de 72,00% com 20 min e 68,59% para 40 min. Da Silva et al., (2020) também constatou

que em temperaturas elevadas foi possível verificar uma maior influência na composição imediata do material torreficado, entretanto, em seu estudo foi observado que mesmo para temperaturas de 160 °C e 220 °C o tempo de residência influenciou na composição de voláteis e carbono fixo.

Como esperado, o valor das cinzas se manteve baixo em para todas as amostras. Entretanto, está análise foi a que apresentou mais pontos com um coeficiente de variação acima de 10%, sendo indicativo de que esta etapa da análise experimental apresentou uma maior inconsistência, possivelmente atrelada com erros de operação. Apesar disso, esta média dispersão não se apresenta como uma interferência para as análises, uma vez que o baixo teor de cinzas em todas as amostras colabora de forma pouco contundente na composição química da biomassa torreficada.

#### 4.6 Análise Elementar

Os valores obtidos para a análise elementar do material *in natura* e torreficado nas diferentes temperaturas estudadas são apresentados na Tabela 4-5, e a Tabela 4-6 é referente aos coeficientes de variação para cada um dos componentes elementares.

Tabela 4-5. Dados análise elementar

Amostra	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)
In Natura	0,53±0,01	46,57±0,13	6,54±0,12	0,11±0,01	46,27±0,28
200	0,50±0,04	47,76±0,06	6,35±0,00	0,09±0,01	45,31±0,11
250	0,49±0,03	50,10±0,03	5,99±0,03	0,09±0,00	43,33±0,08
300	0,52±0,00	55,20±0,01	5,34±0,01	0,10±0,00	38,85±0,02

Fonte: Autor (2021). (valores % seguidos pelo seu desvio padrão)

Tabela 4-6. Coeficiente de variação análise elementar

Amostra	Coeficiente de Variação (%)				
	N	C	H	S	O
In Natura	2,67	0,29	1,84	6,73	0,60
200	8,49	0,13	0,00	8,32	0,25
250	5,77	0,06	0,47	0,00	0,20
300	0,00	0,03	0,13	0,00	0,05

Fonte: Autor (2021)

Os valores de coeficiente de variação ficaram situados abaixo de 10%, indicando uma boa reprodutibilidade experimental.

Partindo dos teores mássicos se constata que ocorreu uma remoção de oxigênio e hidrogênio das amostras, sendo influenciada pela temperatura, com maiores teores de remoção para o material torreficado a 300 °C, onde 16% de oxigênio e 18% de hidrogênio foram removidos. Já o carbono teve sua concentração aumentada em 19% na condição de torrefação a 300 °C.

A redução do teor de oxigênio, como descrito por Felfi et al. (2005), são favoráveis uma vez que propiciam uma menor geração de fumaça e vapor d'água, melhorando o aproveitamento energético. Os valores das razões O/C e H/C indicam que o material torreficado apresentou uma melhora energética, que significa um maior potencial em aplicar este material como fonte para geração energética.

Aplicando as Equações propostas por Nuchem (2016) foi possível obter os valores de carbono, hidrogênio e oxigênio, que constam na Tabela 4-7, por meio da correlação com os valores obtidos para a análise imediata.

Tabela 4-7. Valores de carbono, hidrogênio e oxigênio obtidos a partir das equações propostas por Nuchem (2016)

Amostra	C (%)	H (%)	O (%)
In Natura	49,12±0,13 (0,27)	6,41±0,01 (0,20)	44,39±0,13 (0,30)
200	49,35±0,34 (0,69)	6,33±0,12 (1,91)	44,24±0,11 (0,26)
250	50,68±0,15 (0,30)	6,24±0,01 (0,18)	42,74±0,12 (0,29)
300	57,18±0,87 (1,52)	5,61±0,08 (1,50)	36,25±0,86 (2,37)

Fonte: Autor (2021). (valores % seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Os valores obtidos a partir da Equação de Nuchem (2016) não apresentaram variação significativa, como indicou a análise de variância, quando comparados com os dados experimentais, demonstrando que este modelo é adequado como forma de predição de carbono, hidrogênio e oxigênio, e corroborando com a representatividade dos valores obtidos na análise imediata.

#### 4.7 Massa específica real

A massa específica real da amostra de diâmetro médio de Sauter igual a 2,35 mm resultou em uma massa específica real igual a 0,98 g cm<sup>-3</sup> Este resultado

apresentou uma variação de 30 % daquele obtido por Cunha (2021) para partículas situadas na faixa de 600-850  $\mu\text{m}$ .

#### 4.8 Massa específica aparente e de leito

Os resultados de massa específica aparente e de leito estão dispostos na Tabela 4-8. A Figura 4-6 ilustra o aumento da massa específica aparente e de leito em função da temperatura de torrefação.

Tabela 4-8. Massa específica aparente e de leito para os materiais in natura e torreficados

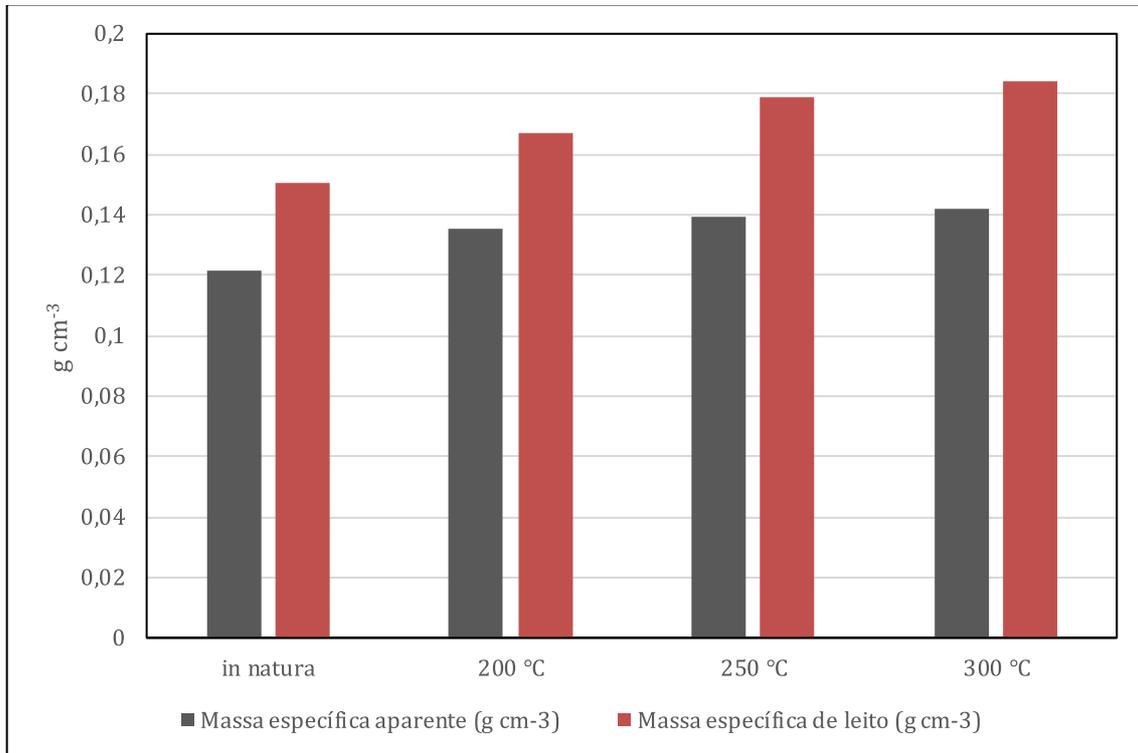
Amostra	Massa específica aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Massa específica de leito ( $\text{g cm}^{-3}$ )
In Natura	0,12153 $\pm$ 0,008 (6,19)	0,15042 $\pm$ 0,014 (9,26)
200 °C	0,13544 $\pm$ 0,006 (4,48)	0,16732 $\pm$ 0,004 (5,64)
250 °C	0,13954 $\pm$ 0,004 (2,86)	0,17894 $\pm$ 0,003 (1,77)
300 °C	0,14189 $\pm$ 0,005 (3,39)	0,18396 $\pm$ 0,009 (2,16)

Fonte: Autor (2021). (dados seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Os valores de coeficiente de variação ficaram todos abaixo de 10%, indicando uma boa precisão na repetição dos ensaios.

Visualizando a Figura 4-6, é possível observar um significativo aumento para a massa específica e de leito em função do aumento da temperatura, o que indica uma maior capacidade de armazenamento mássico do material torreficado quando comparado com a biomassa *in natura*. Estes dados são importantes para poder determinar a densidade energética do material torreficado, uma característica que se constatou nem sempre estar presente nos trabalhos revisados.

Figura 4-6. Comparação entre massa específica aparente e de leite para os materiais in natura e torreficados



Fonte: Autor (2021)

#### 4.9 Poder Calorífico Superior

Os valores obtidos de poder calorífico superior por meio da análise imediata estão dispostos na Tabela 4-9.

Tabela 4-9. PCS obtido por meio da análise imediata

Amostra	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )			
	Nhuchhen e Salam (2012)	Demirbas et al., (1997)	Parikh, Channiwala e Ghosal (2005)	Cordero et al. (2001)
In Natura	20,29±0,26 (1,94)	16,69±0,05 (0,26)	18,17±0,06 (0,33)	19,47±0,05 (0,28)
200.20	20,49±0,43 (2,59)	16,80±0,07 (0,40)	18,28±0,07 (0,00)	19,57±0,07 (0,00)
200.30	20,30±0,71 (4,21)	16,82±0,07 (0,41)	18,29±0,07 (0,00)	19,59±0,07 (0,00)
200.40	19,63±0,87 (5,22)	16,72±0,04 (0,27)	18,18±0,04 (0,00)	19,48±0,04 (0,00)
250.20	20,99±0,20 (1,16)	17,41±0,29 (1,68)	18,89±0,29 (0,02)	20,14±0,27 (0,01)
250.30	20,47±0,13 (0,77)	17,40±0,05 (0,27)	18,87±0,05 (0,00)	20,12±0,04 (0,00)
250.40	19,97±0,27 (1,57)	17,31±0,12 (0,69)	18,78±0,12 (0,01)	20,04±0,11 (0,01)
300.20	22,16±0,61 (3,09)	19,57±0,43 (2,19)	21,06±0,43 (0,02)	22,16±0,40 (0,02)
300.30	23,16±0,86 (4,30)	19,92±0,55 (2,76)	21,42±0,56 (0,03)	22,49±0,52 (0,02)
300.40	21,87±0,49 (2,41)	20,23±0,70 (3,45)	21,72±0,70 (0,03)	22,77±0,65 (0,03)

Fonte: Autor (2021). (dados seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Os coeficientes de variação ficaram todos abaixo de 10%, assim como para os dados da análise imediata.

Comparando o valor de PCS experimental de 18,891 MJ kg<sup>-1</sup> da amostra *in natura* obtido por Cunha (2021), que fez uso da biomassa oriunda de *Eucalyptus grandis* da mesma fonte que a aplicada neste estudo, a equação com menor desvio padrão (0,41), como pode ser observado na Tabela 4-10, foi a proposta por Cordero et al. (2001). Este modelo não leva em consideração o teor de cinzas, tornando-o adequado para ser utilizado em biomassas, uma vez que biomassas, em geral, apresentam um baixo conteúdo de cinzas. A equação proposta por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) apresentou um desvio padrão de 0,51 para a amostra *in natura*, com um coeficiente de variação 0,62% superior ao modelo de Cordero et al. (2001), sendo as duas as equações que retornaram valores mais próximos aos valores experimentais obtidos por Cunha (2021).

Tabela 4-10. Valores de desvio padrão e coeficiente de variação para o PCS das amostras *in natura* comparadas ao valor experimental obtido por Cunha (2021).

	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)
Nhuchhen e Salam (2012)	20,29	1,55	7,93
Demirbas et al., (1997)	16,69	0,99	5,57
Parikh, Channiwala e Ghosal (2005)	18,17	0,51	2,76
Cordero et al. (2001)	19,47	0,41	2,14
Cunha (2021)	18,891		

É possível observar que, para o PCS obtido por meio da análise imediata, a temperatura de torrefação de 200 °C não propiciou um aumento significativo desta propriedade energética, diferente do que Singh et al. (2020), Da Silva et al. (2020), Alvarez et al. (2018), encontraram em seus estudos. Estes autores observaram um aumento do poder calorífico na temperatura de 200 °C quando comparado com o valor de PCS da amostra *in natura*, entretanto foi um aumento discreto quando comparado com o propiciado por temperaturas de torrefação mais elevadas.

Silveira et al. (2021) observaram que a temperatura de torrefação de 210 °C não acarretou ganhos significativos de PCS para a biomassa de *Eucalyptus grandis* utilizada, a mesma aplicada neste estudo.

Este comportamento era esperado por meio da utilização das Equações que correlacionam a análise imediata com o PCS, uma vez que o teor de voláteis, carbono fixo e cinzas encontrados nas amostras torrificadas não apresentaram variação significativa em relação à amostra *in natura*.

Como pode ser observado na Tabela 4-11, onde constam os resultados dos testes de análise de variância e Kruskal-Wallis para os valores de PCS obtidos entre as diferentes Equações utilizadas, é possível constatar que existe diferença significativa entre elas, demonstrando ser necessário determinar outras formas de comparação para que o valor de PCS mais representativo seja alcançado.

Tabela 4-11. One-way ANOVA para as diferentes Equações utilizadas para determinar o PCS

Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	164,22	3	54,7401	30,75	1,41E-14
Within groups:	199,381	112	1,78019	Permutation p (n=99999)	
Total:	363,601	115	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	1,8262	Var(error):	1,78019	ICC:	0,506379
omega <sup>2</sup> :	0,4348				
Levene's test for homogeneity of variance, from means		p (same):		0,2021	
Levene's test, from medians		p (same):		0,9093	
Welch F test in the case of unequal variances: F=30,22, df=62,05, p=3,645E-12					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
		H (chi <sup>2</sup> ):	49,82		
		Hc (tie corrected):	49,82		
		p (same):	8,75E-11		
There is a significant difference between sample medians					

Fonte: Autor (2021)

Os dados de PCS obtidos fazendo uso das equações que correlacionam esta variável com a composição obtida na análise elementar estão dispostos na Tabela 4-12. Onde é possível observar que os coeficientes de variação foram todos abaixo de

10%, o que era esperado, uma vez que o mesmo comportamento foi verificado para os dados da análise elementar.

Como descrito por Sheng e Azevedo (2005), determinar o PCS partindo da análise elementar é uma forma mais precisa quando comparada a predição do PCS pela análise imediata, uma vez que esta caracterização fornece apenas uma composição empírica da biomassa.

Assim como as predições pela análise imediata, existem inúmeras equações propostas para a predição do PCS por meio da análise elementar. Optou-se por fazer o uso das equações aqui descritas como forma de comparar os resultados obtidos a partir delas e comparar com o valor de PCS *in natura* determinado experimentalmente por Cunha (2021).

Tabela 4-12. PCS obtido por meio da análise elementar

Amostra	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )		
	Sheng e Azevedo (2005)	Boie (1950)	Lloyd-Davenport (1980)
In Natura	19,29±0,12 (0,61)	17,40±0,19 (1,10)	18,73±0,18 (0,97)
200	19,50±0,02 (0,08)	17,74±0,04 (0,21)	19,06±0,03 (0,16)
250	19,93±0,03 (0,13)	18,43±0,05 (0,26)	19,74±0,04 (0,21)
300	20,92±0,01 (0,04)	20,08±0,01 (0,07)	21,34±0,01 (0,06)

Fonte: Autor (2021). (dados seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Destas equações, como pode ser verificado na Tabela 4-13, a que apresentou menor desvio padrão (0,1) e coeficiente de variação (0,6) no valor de PCS do material *in natura* quando comparado com o valor experimental de Cunha (2021) foi a de Lloyd-Davenport (1980).

Tabela 4-13. Comparação entre os valores teóricos de PCS obtidos com o experimental determinado por Cunha (2021)

	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )	Desvio Padrão	CV (%)
Sheng e Azevedo (2005)	19,29	0,3	1,5
Boie (1957)	17,40	1,1	5,8
Lloyd-Davenport (1980)	18,73	0,1	0,6
Cunha (2021)	18,891		

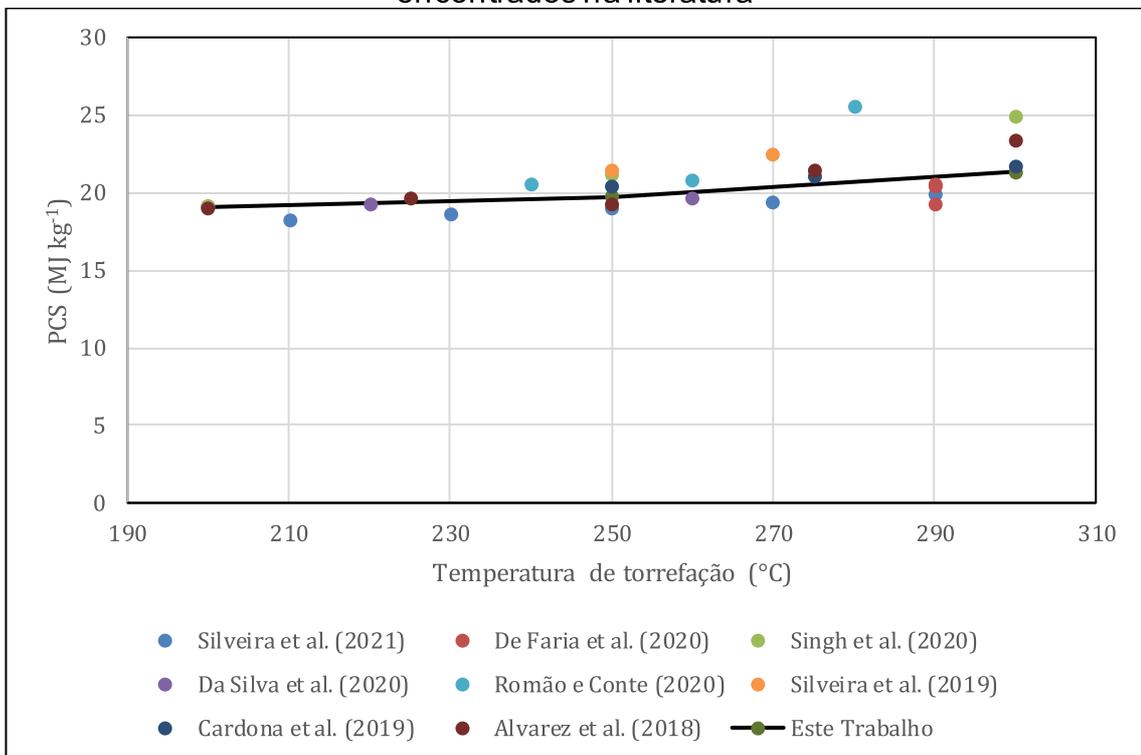
Fonte: Autor (2021)

Por meio do teste de variância e de Kruskal-Wallis constata-se que, entre os valores de PCS oriundos das três equações que correlacionam esta variável com a análise elementar, não foi observada uma variação significativa.

É possível observar que o PCS foi diretamente influenciado pela temperatura da torrefação, com a temperatura de 300 °C responsável por um PCS de 21,34 MJ kg<sup>-1</sup>, correspondendo a um aumento de 12,23%.

Comparando os valores de PCS obtidos neste trabalho com dados presentes na literatura foi possível construir o gráfico presente na Figura 4-7, onde foram relacionadas a variação de poder calorífico superior com a temperatura do processo de torrefação.

Figura 4-7. Comparação entre o PCS obtido neste trabalho com valores encontrados na literatura



Fonte: Autor (2021)

É possível observar uma grande proximidade dos valores encontrados na literatura com os obtidos neste estudo, com todos eles demonstrando que o aumento da temperatura exerce influência positiva no valor do PCS. Este comportamento é desejado, uma vez que esta propriedade determinará o uso da biomassa em aplicações energéticas.

As maiores divergências em relação ao presente trabalho foram encontradas nos trabalhos de Romão e Conte (2020), que verificou um PCS de 25,61 MJ kg<sup>-1</sup> para a temperatura de 280 °C; e de Singh et al. (2020), que constatou um PCS de 24,89 MJ kg<sup>-1</sup> na temperatura de 300 °C. Apesar de exibirem o mesmo comportamento, ou seja, ocorrer aumento do PCS em função da temperatura, a linearização entre os dados destes estudos não foi satisfatória, retornando um R<sup>2</sup>=0,37.

Test for equal means					
	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	5,31012	2	2,65506	2,421	0,1441
Within groups:	9,87175	9	1,09686	Permutation p (n=99999)	
Total:	15,1819	11	0,1503		
Components of variance (only for random effects):					
Var(group):	0,389549	Var(error):	1,09686	ICC:	0,26207
omega <sup>2</sup> :	0,1914				
Levene's test for homogeneity of variance, from means				p (same):	0,6998
Levene's test, from medians				p (same):	0,7582
Welch F test in the case of unequal variances: F=2,11, df=5,648, p=0,2068					
Kruskal-Wallis test for equal medians					
		H (chi <sup>2</sup> ):	3,038		
		Hc (tie corrected):	3,038		
		p (same):	0,2189		
There is no significant difference between sample medians					

Fonte: Autor (2021).

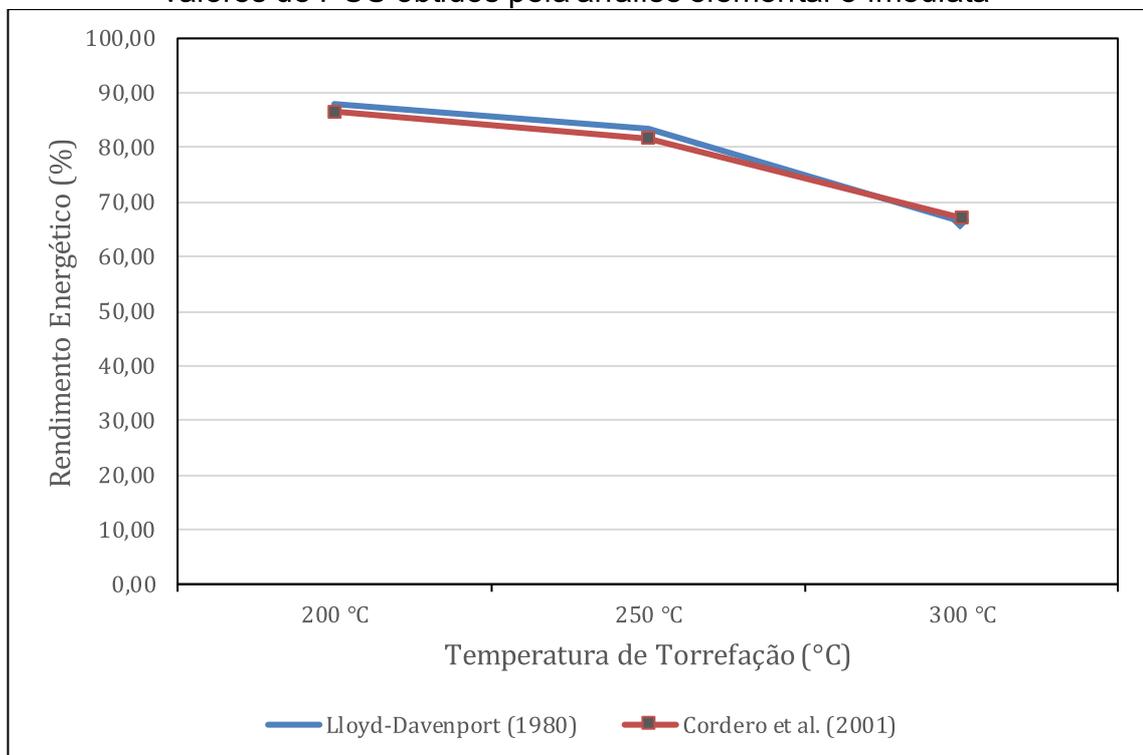
Com os valores de PCS determinados foi possível definir o rendimento energético, sendo está uma variável que avalia a porcentagem de energia retida no material, que não foi perdida com a massa volatilizada. Na Tabela 4-14 estão os dados de rendimento energético calculados a partir dos valores de PCS oriundos da Equação 3-20 (Lloyd-Davenport, 1980) e da Equação 3.17 (Cordero et al., 2001). Na Figura 4-8 está apresentado um gráfico que relaciona o rendimento energético com a temperatura de torrefação para as duas Equações utilizadas.

Tabela 4-14. Rendimento Energético para as diferentes temperaturas de torrefação estudadas

<b>Rendimento Energético (%)</b>			
	200 °C	250 °C	300 °C
Lloyd-Davenport (1980)	87,97	83,53	66,46
Cordero et al. (2001)	86,59	81,64	67,13

Fonte: Autor (2021)

Figura 4-8. Rendimento energético em função da temperatura de torrefação com valores de PCS obtidos pela análise elementar e imediata



Fonte: Autor (2021)

#### 4.10 Densidade Energética

Com os valores de massa específica aparente, de leito e o PCS determinados, foi possível calcular a densidade energética (DE) em  $\text{MJ m}^{-3}$ , como consta na Tabela 4-15.

Tabela 4-15. Densidade energética calculada a partir da massa específica aparente e massa específica de leito

Amostra	DE (MJ m <sup>-3</sup> ) – massa específica aparente	Aumento %
In Natura	2275,77	--
200 °C	2581,76	11,85
250 °C	2754,42	17,38
300 °C	3028,24	24,85
Amostra	DE (MJ m <sup>-3</sup> ) – massa específica de leito	Aumento %
In Natura	2816,85	--
200 °C	3189,48	11,68
250 °C	3532,18	20,25
300 °C	3926,08	28,25

Fonte: Autor (2021)

É possível verificar que, apesar do rendimento energético ter diminuído com o aumento da temperatura de torrefação, uma vez que essa variável está diretamente relacionada com a perda mássica, a densidade energética foi positivamente influenciada pelo aumento da temperatura. Isso ocorreu pois o aumento da temperatura produziu um material com um PCS até 12% (na condição de 300 °C) superior à biomassa *in natura*, elevando também a massa específica aparente dos materiais torreficados.

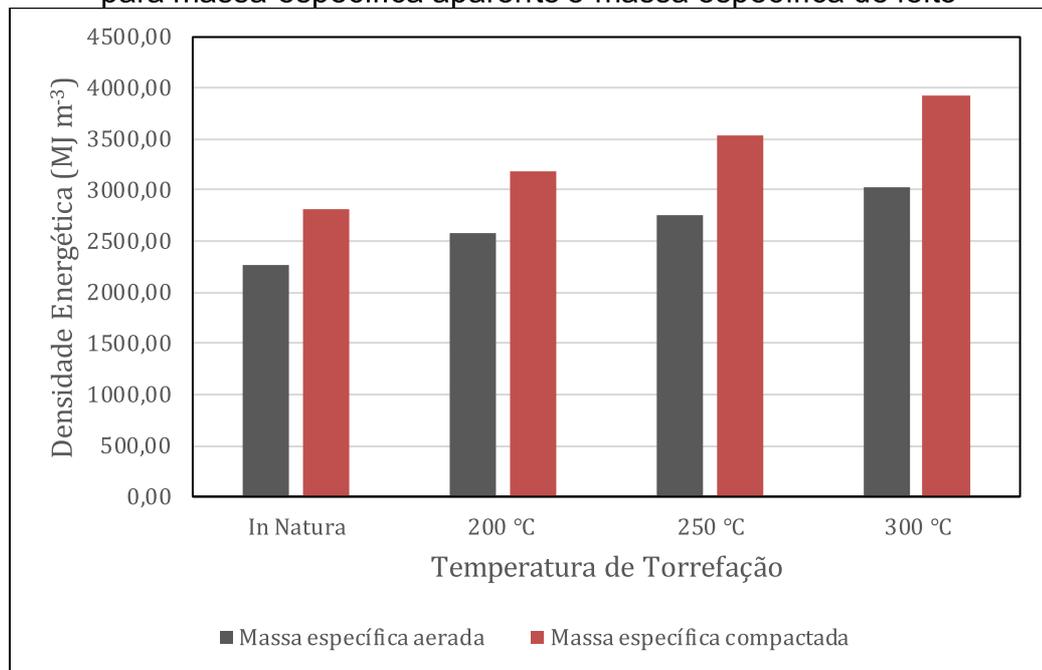
Para a condição de 300 °C o valor de densidade energética atingido foi de 3028,24 MJ m<sup>3</sup>, representando um aumento de 24,85% em comparação com a biomassa *in natura*. Para a condição de 300 °C e considerando a massa específica de leito (compactada), o valor encontrado foi de 3926,08 MJ m<sup>3</sup>, representando um aumento de 28,25% quando comparado com a biomassa *in natura*.

Esses resultados são importantes uma vez que indicam a possibilidade de crescer consideravelmente a capacidade de estocagem energética da biomassa. Levando em consideração os resultados do trabalho de De Faria et al. (2021), que observou uma maior resistência a ataques microbiológicos na biomassa torreficada, este tratamento térmico mostra-se promissor como forma de melhoras características de armazenamento da biomassa, sendo possível num mesmo espaço dispor uma maior quantidade de material (uma vez que a massa específica é aumentada), com maior densidade energética e com menores probabilidades de sofrer danos microbiológicos.

A Figura 4-9 faz uma comparação entre os valores de densidade energética obtidos para a massa específica aparente e massa específica de leito em função da

temperatura de torrefação, onde é possível observar que a temperatura de torrefação de 300 °C foi a que propiciou os maiores ganhos tanto para os valores determinados pela massa específica aparente quanto para a massa específica de leito.

Figura 4-9. Comparação entre os valores de densidade energética obtidos para massa específica aparente e massa específica de leito



Fonte: Autor (2021)

#### 4.11 Determinação da granulometria em função da temperatura de torrefação

Na Tabela 4-16 estão dispostas as distribuições do tamanho de partícula para as faixas de abertura de peneiras estudadas para as diferentes temperaturas de torrefação.

É possível observar que a porcentagem em massa do material se desloca para peneiras de menor abertura em função do aumento da temperatura da torrefação, demonstrando que as alterações estruturais provocadas na biomassa por este processo envolvem a redução de sua granulometria.

Tabela 4-16. Distribuição do tamanho de partícula das amostras (% em massa)

Abertura das peneiras (mm)	In Natura	200 °C	250 °C	300 °C
+9,52	2,63	2,14	2,32	0,87
-9,52 + 4,75	17,91	15,75	14,77	12,55
-4,75 +2,38	44,45	38,83	38,33	33,90
-2,38 +1,19	23,68	28,24	28,77	31,25
-1,19 +0,6	8,53	11,92	12,19	15,54
-0,6 +0,425	0,98	1,36	1,39	1,91
-0,425 +0,25	0,94	1,06	1,13	2,12
-0,25	0,89	0,71	1,09	1,85

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 4-17 encontram-se os diâmetros médios calculados a partir da distribuição granulométrica obtida para cada amostra.

Tabela 4-17. Diâmetros médios da biomassa in natura e do material torreficado

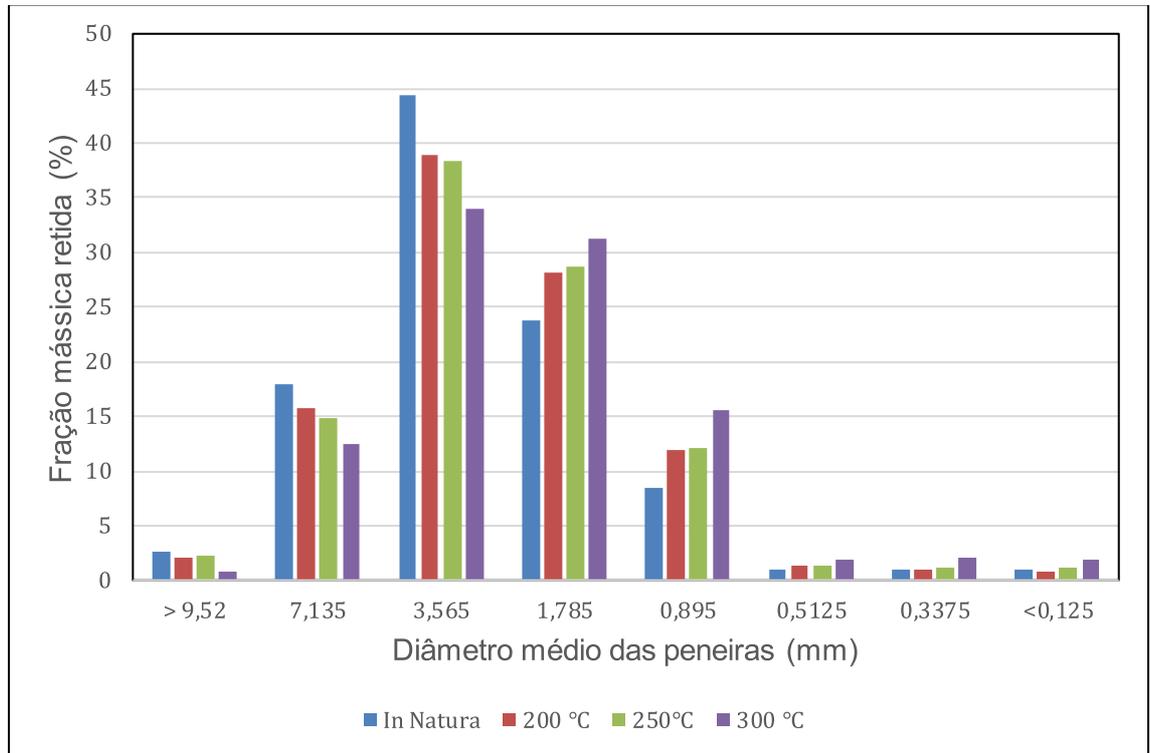
Diâmetros médios (mm)	In Natura	200 °C	250 °C	300 °C
Diâmetro Médio Linear	0,70	0,69	0,68	0,60
Diâmetro Médio Areolar	0,44	0,40	0,39	0,29
Diâmetro Médio Volumar	0,68	0,55	0,53	0,34
Diâmetro Médio Sauter	2,36	2,08	2,06	1,78

Fonte: Autor (2021)

Se observa a redução dos diâmetros médios em função do aumento da temperatura de torrefação, com o diâmetro médio de Sauter atingindo 1,78 mm na amostra torreficada a 300 °C, representando uma redução 25% em sua granulometria. Esta redução granulométrica está relacionada com as perdas de voláteis que ocorrem no material, e são mais acentuadas em maiores temperaturas, e com a elevação da friabilidade, fazendo com que as amostras torreficadas sejam quebradas com mais facilidade.

A Figura 4-10 ilustra a fração mássica retida em cada peneira, considerando o diâmetro médio como a abertura média entre duas peneiras consecutivas. Nela se verifica que as maiores frações encontradas para a biomassa *in natura* estavam situadas nos diâmetros médios de 3,565 mm e 1,785 mm, ocorrendo um deslocamento em massa para diâmetros menores conforme a temperatura do processo foi elevada.

Figura 4-10. Fração mássica da biomassa *in natura* e torrificada retida em cada peneira



Fonte: Autor (2021)

Estes resultados estão de acordo com os obtidos para a massa específica aparente e de leito, onde foi verificado um aumento nos seus respectivos valores, com a diminuição da granulometria influenciando nestas variáveis, uma vez que partículas menores podem mais facilmente se arranjar de forma a ocupar um menor volume, com tais características estando envolvidas com o melhoramento da capacidade de estocagem de material.

#### 4.12 Determinação da melhoria da moagem

Após passar pelo processo de moagem a biomassa foi peneirada e os valores de material retido em cada uma das peneiras para as diferentes temperaturas de torrefação encontram-se na Tabela 4-18.

Tabela 4-18. Distribuição do tamanho de partícula das amostras (% em massa) após serem submetidas à moagem

Abertura das peneiras (mm)	In Natura	200	250	300
+9,52	0	0	0	0
-9,52 + 4,75	4,54	3,99	0,77	0,00
-4,75 + 2,38	41,55	37,90	25,26	13,40
-2,38 + 1,19	35,17	36,41	36,38	34,35
-1,19 + 0,6	13,91	15,95	23,88	30,06
-0,6 + 0,425	2,13	2,34	4,95	7,27
-0,425 + 0,25	1,55	1,98	4,61	7,41
-0,25	1,16	1,42	4,14	7,51

Fonte: Autor (2021)

Assim como para a determinação granulométrica do material torreficado, para o material torreficado e moído constatou-se um deslocamento da porcentagem de massa retida em cada peneira, com maiores temperaturas propiciando uma maior porcentagem de material retida em peneiras com menores diâmetros.

Se constata que a moagem foi fortemente facilitada para o material torreficado a 300 °C, onde 52,25% do material ficou situada abaixo de 1,19 mm. Para o material *in natura*, apenas 18,75% da biomassa ficou situada nas peneiras com diâmetro menor do que 1,19 mm.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Arias et al. (2008), que constataram uma maior dificuldade na redução da granulometria do material *in natura* e uma melhora nas características de moagem da biomassa torreficada, uma vez que a porcentagem de partículas que passam para as frações de menor tamanho aumentou muito nas amostras submetidas ao processo de torrefação.

A Tabela 4-19 é referente aos diâmetros médios obtidos para cada uma das amostras estudadas, onde se verifica que para todas as amostras ocorreu diminuição da granulometria, sendo mais acentuada no material torreficado.

Tabela 4-19. Diâmetros médios da biomassa in natura e do material torreficado após a moagem

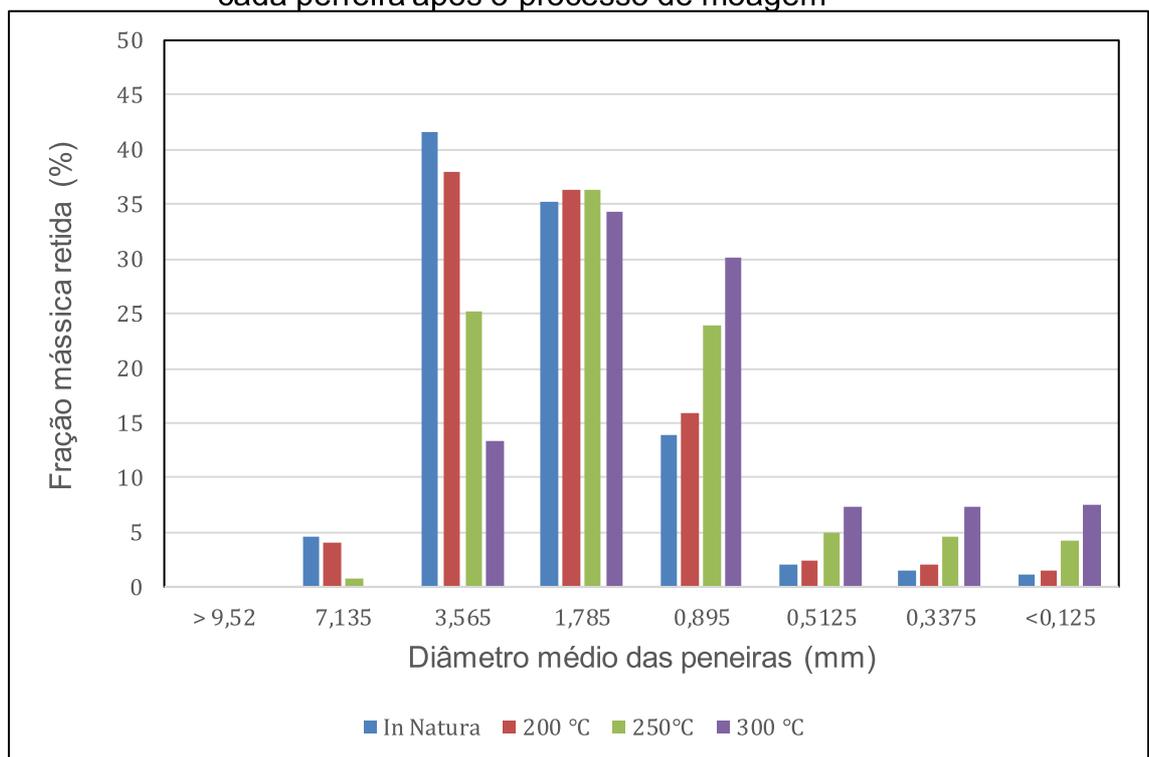
Diâmetros médios (mm)	In Natura	200 °C	250 °C	300 °C
Diâmetro Médio Linear	0,65	0,62	0,52	0,48
Diâmetro Médio Areolar	0,34	0,30	0,20	0,16
Diâmetro Médio Volumar	1,70	1,46	0,74	0,49
Diâmetro Médio Sauter	1,78	1,67	1,29	1,08

Fonte: Autor (2020)

Para a amostra *in natura*, o diâmetro médio de Sauter foi de 1,78 mm, representando uma redução de 24,58%. Para a amostra tratada a 300 °C, o diâmetro médio foi de 1,08 mm, 39,33% menor do que o diâmetro médio de Sauter inicial, que era de 1,78 mm. O deslocamento de material para peneiras de menor diâmetro pode ser visualizada na Figura 4-11, onde se observa que a partir da temperatura de 250 °C maiores frações mássicas são retidas abaixo de 0,895 mm, com a temperatura de 200 °C mostrando-se a que menos influenciou na facilidade da moagem, atingindo valores próximos aos da biomassa *in natura*.

Ao se comparar o valor do material *in natura*, sem nenhum tipo de tratamento, com o material tratado a 300 °C e moído, a redução granulométrica obtida é de 54,24%.

Figura 4-11. Fração mássica da biomassa *in natura* e torrificada retida em cada peneira após o processo de moagem



Fonte: Autor (2021)

### 4.13 Ângulo de repouso

Os dados obtidos para o ângulo de repouso ( $A_r$ ) para a biomassa *in natura* e torrificada estão dispostos na Tabela 4-20.

Tabela 4-20. Ângulo de repouso das amostras torrificadas e in natura

Amostra	Ângulo (°)
In Natura	54,76±3,04 (5,55)
200 °C	46,72±0,54 (1,15)
250 °C	42,54±3,82 (8,97)
300 °C	38,22±1,13 (2,97)

Fonte: Autor (2021). (dados seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

O ângulo de repouso foi consideravelmente reduzido em função do aumento da temperatura de torrefação. Partindo da classificação de Oka (2004), que classificou a fluidez dos materiais utilizando  $A_r$  como parâmetro, têm-se que a biomassa *in natura*, com um ângulo de repouso de 54,76±3,04, é um material do tipo muito coesivo; o material torrificado a 200 °C, com ângulo de repouso de 46,72±0,54, como coesivo; o torrificado a 250 °C como material de fluidez razoável e o torrificado a 300 °C como um material de boa fluidez.

Materiais de boa fluidez são aqueles que escoam com facilidade, sem apresentar restrições ao fluir de silos, dutos etc. Já os materiais coesivos são aqueles que apresentam maior resistência ao escoamento, necessitando de interferência externa, como auxílio vibratório, por exemplo, para que possam apresentar um escoamento satisfatório.

Assim, o aumento da temperatura da torrefação diminuiu o ângulo de repouso dos materiais, sendo isto considerado uma melhoria em suas características, permitindo que seja mais bem aplicado em sistemas de geração energética já existentes, por exemplo, com menos riscos de apresentar problemas operacionais.

### 4.14 Teste plano inclinado

Os dados obtidos para o teste de plano inclinado para a biomassa *in natura* e torrificada estão dispostos na Tabela 4-21.

Tabela 4-21. Teste plano inclinado para amostras torrificadas e in natura

Amostra	Ângulo (°)	Coefficiente de atrito
In Natura	29,10±1,56 (5,37)	1,09
200 °C	27,15±0,80 (2,97)	2,10
250 °C	28,05±0,27 (0,95)	0,23
300 °C	29,30±0,01 (0,04)	1,65

Fonte: Autor (2021). (dados seguidos pelo seu desvio padrão e CV%)

Para a amostra *in natura* foi necessário elevar a prancha do ensaio em 29,10° para que ocorresse o deslizamento; a amostra torrificada a 200 °C necessitou de uma inclinação menor, de 27,15°. A partir das amostras torrificadas a 250 °C o ângulo necessário para o deslizamento foi aumentando, tornando necessário elevar em 29,30° para ocorrer o deslizamento da biomassa torrificada a 300 °C. Esse comportamento pode ser devido ao fato de que a biomassa tratada na temperatura mais elevada resultou em um material com partículas de baixa granulometria que se aderiam com grande facilidade na parede da prancha utilizada para o ensaio, fazendo com que o coeficiente de atrito fosse aumentado. Outro fator que pode estar associado com o maior ângulo necessário para o deslizamento da biomassa tratada a 300 °C é a porosidade do material. O tratamento térmico promove um aumento da porosidade por meio da eliminação de compostos presentes na biomassa, e isto pode propiciar um aumento nas propriedades adesivas do material.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos para a torrefação da biomassa residual de *Eucalyptus grandis*, foi possível constatar que a temperatura de torrefação de 300 °C com tempo de residência de 20 min gerou um material que, apesar de produzir o menor rendimento gravimétrico e energético, possuía uma massa específica aparente e um PCS que o condicionaram como o material de maior densidade energética. Nestas condições, também foi obtido o material com a menor granulometria e que permitiu a maior redução granulométrica ao passar pelo processo de moagem, sendo também a amostra com menor ângulo de repouso, o enquadrando como um material de boa fluidez.

Além disso, a torrefação deste material permitiu que as seguintes conclusões fossem obtidas:

- A temperatura de torrefação é o fator de maior impacto na modificação das estruturas físico-químicas da biomassa;

- O maior valor de PCS obtido foi para a torrefação realizada a 300 °C, representando um aumento de 12,23% quando comparado com a biomassa *in natura*;

- O aumento da temperatura gera um material de menor granulometria e mais friável, facilitando as operações de moagem, com a torrefação realizada a 300 °C produzindo um material de diâmetro 25% menor quando comparado com a amostra *in natura*. Após a moagem, essa biomassa torrificada a 300 °C apresentou um diâmetro 39,33% menor quando comparado com a mesma amostra torrificada e 54,24% menor quando comparado com a amostra *in natura* não moída.

- Apesar do aumento em PCS não ter atingido valores tão altos como alguns encontrados na literatura para biomassa de eucalipto, o aumento da massa específica aparente propiciou que ocorresse um ganho em densidade energética de 24,85% e 28,25% para a massa específica aparente e de leito.

- Além disso, também foi verificado uma diminuição do ângulo de repouso em função do aumento da temperatura. Por outro lado, o ângulo de deslizamento foi aumentado em função da elevação da temperatura, indicando que mais estudos são necessários para verificar as reais modificações produzidas no material torrificado em relação à sua coesividade.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros envolvendo a torrefação de *Eucalyptus grandis*, ficam as que seguem:

- Avaliar o balanço energético e a viabilidade de aplicação de biomassa torrificada;
- Realizar um estudo mais amplo acerca do teste de plano inclinado, com condições como a umidade do ar, por exemplo, mais controladas, uma vez que esta variável pareceu influenciar nas medições realizadas neste trabalho;
- Empregar o material torrificado em sistema de co-combustão com carvão para avaliar as melhorias obtidas ao empregar o material torrificado em comparação com o *in natura*; e
- Avaliar a inserção da biomassa torrificada como combustível para geração energética em sistemas já existentes.

## REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ, A., NOGUEIRO, D., PIZARRO, C., MATOS, M. e BUENO, J. L. Non-oxidative torrefaction of biomass to enhance its fuel properties. **Energy**, 158, 1-8, 2018.
- ARAÚJO, S. D. O., NEIVA, D. M., CARNEIRO, A. D. C., ESTEVES, B. e PEREIRA, H. Potential of mild torrefaction for upgrading the wood energy value of different Eucalyptus species. **Forests**, v. 9, n. 9, p. 535, 2018.
- ARAÚJO, S., BOAS, M. A. V., NEIVA, D. M., de CASSIA CARNEIRO, A., VITAL, B., BREGUEZ, M., e PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 181-186, 2016.
- AREIAS, A. A.; JÚNIOR, J. C. .; YAMAJI, F. M.. Estudo de mercado sobre o uso de biomassa para queima no Estado de São Paulo, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e1429119566-e1429119566, 2020.
- ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSE, J., PLAZA, M. G., RUBIERA, F., & PIS, J. J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 2, p. 169-175, 2008.
- ARTEAGA-PÉREZ, L. E., JIMÉNEZ, R., GROB, N., GÓMEZ, O., ROMERO, R., & RONSSE, F. Catalytic upgrading of biomass-derived vapors on carbon aerogel-supported Ni: Effect of temperature, metal cluster size and catalyst-to-biomass ratio. **Fuel processing technology**, v. 178, p. 251-261, 2018.
- ARTEAGA-PÉREZ, L. E., GRANDÓN, H., FLORES, M., SEGURA, C., & KELLEY, S. S. Steam torrefaction of Eucalyptus globulus for producing black pellets: A pilot-scale experience. **Bioresource technology**, v. 238, p. 194-204, 2017.
- ASCENÇÃO, M. S. de; MALAGUTTI, G. P. **Scale-up de um sistema de tratamento térmico de biomassa por torrefação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). UNB 2019.
- BATES, R. B.; GHONIEM, A. F. Biomass torrefaction: Modeling of reaction thermochemistry. **Bioresource technology**, v. 134, p. 331-340, 2013.
- BATIDZIRAI, B., VANDER HILST, F., MEERMAN, H., JUNGINGER, M. H., & FAAIJ, A. P.. Optimization potential of biomass supply chains with torrefaction technology. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 253-282, 2014.
- BENAVENTE V, F. A. Torrefaction of olive mill waste. **Biomass Bioenergy** 2015; 73:186–94.
- BORGES, A.; ALVES, C.; TORRES, E. Torrefied eucalyptus grandis characterization as a biomass to using in industrial scale. **Chemical Engineering Transactions**, v. 49, p. 283-288, 2016.
- C. SHENG, J.L.T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, **Biomass Bioenergy** 28 (2005) 499–507, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>.
- DE CAMPOS, R. F. F.; BORGA, T. Análise do processo de co-combustão da biomassa, através da influência da umidade do cavaco na emissão de contaminantes atmosféricos, eficiência energética e geração de cinzas. **Revista Brasileira de Geografia**, v.10, n.05 1471-1480, 2017.
- CARDONA, S., GALLEGÓ, L. J., VALENCIA, V., MARTÍNEZ, E., & RIOS, L. A. Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 17-24, 2019.
- CARNEIRO, J. A. M. **Desenvolvimento experimental de um reator em batelada para torrefação de biomassa**. Dissertação de Mestrado. UFBA 2015.
- CAVAGNOL, S., SANZ, E., NASTOLL, W., ROESLER, J. F., ZYMLA, V., & PERRÉ, P. Inverse analysis of wood pyrolysis with long residence times in the temperature range 210–290 C: Selection of multi-step kinetic models based on mass loss residues. **Thermochemica acta**, v. 574, p. 1-9, 2013.
- CHEN, W. H., LU, K. M., LIU, S. H., TSAI, C. M., LEE, W. J., & LIN, T. C. Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. **Bioresource technology**, v. 146, p. 152-160, 2013.

- CHEN, W. H., LU, K. M., LEE, W. J., LIU, S. H., & LIN, T. C. Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. **Applied Energy**, v. 114, p. 104-113, 2014.
- CHEN, W. H., KUO, P. C., LIU, S. H., & WU, W. Thermal characterization of oil palm fiber and eucalyptus in torrefaction. **Energy**, v. 71, p. 40-48, 2014.
- CHEN, W. H.; CHEN, C. J.; HUNG, C. I. Taguchi approach for co-gasification optimization of torrefied biomass and coal. **Bioresource technology**, v. 144, p. 615-622, 2013.
- COSTA, E. V. S., PEREIRA, M. P. D. C. F., SILVA, C. M. S. D., PEREIRA, B. L. C., ROCHA, M. F. V., & CARNEIRO, A. D. C. O. Torrefied briquettes of sugar cane bagasse and Eucalyptus. **Revista Árvore**, v. 43, 2019.
- DA SILVA IGNACIO, L. H.; DE ALMEIDA SANTOS, P. E.; DUARTE, C. A. R. An experimental assessment of Eucalyptus urosemente energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 361-369, 2019.
- DA SILVA, C. M. S., CARNEIRO, A. D. C. O., PEREIRA, B. L. C., VITAL, B. R., ALVES, I. C. N., & de Magalhaes, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 6, p. 845-850, 2016.
- DA SILVA, C. M. S., VITAL, B. R., ANGÉLICA DE CÁSSIA, O. C., COSTA, E. V., DE MAGALHÃES, M. A., & TRUGILHO, P. F. Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. **Industrial Crops and Products**, v. 109, p. 598-602, 2017.
- DA SILVA, J. C. G., PEREIRA, J. L. C., ANDERSEN, S. L. F., MOREIRA, R. D. F. P. M., & JOSÉ, H. J. Torrefaction of ponkan peel waste in tubular fixed-bed reactor: In-depth bioenergetic evaluation of torrefaction products. **Energy**, v. 210, p. 118569, 2020.
- DA SILVA, R. L., JÚNIOR, J. R. P., SEYE, O., MICHELS, C. S., DE PAULA, I. O., & SCHNEIDER, P. S. Experimental investigation on eucalyptus sawdust torrefaction for energy properties upgrading. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 125, 2020.
- DE CASTRO, V. R., DE CASTRO FREITAS, M. P., ZANUNCIO, A. J. V., ZANUNCIO, J. C., SURDI, P. G., CARNEIRO, A. D. C. O., & VITAL, B. R. Resistance of in natura and torrefied wood chips to xylophage fungi. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-6, 2019.
- DE FREITAS HOMEM DE FARIA, B., LANVIN, C., VALETTE, J., ROUSSET, P., DE CASSUA OLIVEIRA CARNEIRO, A., CALDEIRA-PIRES, A., & CANDELIER, K. Effect of leaching and fungal attacks during storage on chemical properties of raw and torrefied biomasses. 2020.
- DODDAPANENI, T. R. K. C., KONTTINEN, J., HUKKA, T. I., & MOILANEN, A. Influence of torrefaction pretreatment on the pyrolysis of Eucalyptus clone: A study on kinetics, reaction mechanism and heat flow. **Industrial Crops and Products**, v. 92, p. 244-254, 2016.
- EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas; Balanço Energético Nacional 2019, ano base 2018; Rio de Janeiro: EPE, 2019, 292p.
- FACCHINI, F. Co-combustão de biomassa torrificada e carvão mineral. **V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. 2017.
- FAN, Y., TIPPAYAWONG, N., WEI, G., HUANG, Z., ZHAO, K., JIANG, L., & LI, H. Minimizing tar formation whilst enhancing syngas production by integrating biomass torrefaction pretreatment with chemical looping gasification. **Applied Energy**, v. 260, p. 114315, 2020.
- FARIAS, F. O. M. **Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Unicamp, 2012.
- FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B. Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas. In: **Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural**. 2000.
- FERLA, J. V. K. Caracterização das cinzas geradas na co-combustão de carvão mineral e biomassa com adição de calcários, em planta piloto com leito fluidizado borbulhante. **Salão de Iniciação Científica**, UFRGS. 2019.

- FIGUEIRÓ, C. G., VITAL, B. R., CARNEIRO, A. D. C. O., SILVA, C. M. S. D., MAGALHÃES, M. A., & FIALHO, L. D. F. Energy valorization of woody biomass by torrefaction treatment: a brazilian experimental study. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 21, n. 3, p. 297-304, 2019.
- FLEIG, O. P., RAYMUNDO, L. M., TRIERWEILER, L. F., & TRIERWEILER, J. O. Study of Rice Husk Continuous Torrefaction as a Pretreatment for Fast Pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, p. 104994, 2020.
- GAO, Q., HAGLUND, P., POMMER, L., & JANSSON, S. Evaluation of solvent for pressurized liquid extraction of PCDD, PCDF, PCN, PCBz, PCPh and PAH in torrefied woody biomass. **Fuel**, v. 154, p. 52-58, 2015.
- GUIMARÃES, H. R. **Estudo da torrefação da cana-energia e seu efeito sobre a cinética de decomposição térmica**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Unicamp. 2016.
- HU, H., LY, C., HU, A., WANG, T., & LU, H. Influence of torrefaction intensities on bamboo (*Acidosasa longiligula*) shoot shell-derived biochar and its application for Tc (VII) reductive immobilization. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 116, p. 266-271, 2020.
- IBÁ. Relatório Anual 2019. IBÁ: Brasília, 2019. Disponível em: [iba-relatorioanual2019.pdf](#). Acesso em: 29 março de 2021.
- IBRAHIM, R. H., DARVELL, L. I., JONES, J. M., & WILLIAMS, A. Physicochemical characterisation of torrefied biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 103, p. 21-30, 2013.
- JUNIOR, J. A. de M. C.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Biomassa torrefeita: um novo combustível para a indústria. **Bahia Análise & Dados**, v. 27, n. 1, p. 204-228, 2018.
- KEIPI, T., TOLVANEN, H., KOKKO, L., & RAIKO, R.. The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. **Biomass and Bioenergy**, v. 66, p. 232-239, 2014.
- KETHOBILE, E.; KETLOGETSWE, C.; GANDURE, J. Torrefaction of non-oil *Jatropha curcas* L. (*Jatropha*) biomass for solid fuel. **Heliyon**, v. 6, n. 12, p. e05657, 2020.
- KIM, Y. H., NA, B. I., LEE S. M., LEE, H. W., & LEE, J. W. Optimal condition for torrefaction of eucalyptus by response surface methodology. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 497-506, 2013.
- KLASS, M., GREENHALF, C., OUADI, M., JAHANGIRI, H., HORNUNG, A., BRIENS, C., & BERRUTI, F. The effect of torrefaction pre-treatment on the pyrolysis of corn cobs. **Results in Engineering**, v. 7, p. 100165, 2020.
- KLAFKE, A. F. **Torrefação de resíduos da indústria de papel e celulose como pré-tratamento para produção de bio-óleo via pirólise rápida**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS, 2018.
- KLAFKE, A. F.; TRIERWEILER, L. F. Efeito do processo de torrefação em serragem de eucalipo. **Blucher chemical engineering proceedings**. São Paulo, 2018.
- LI, X., LU, Z., CHEN, J., CHEN, X., JIANG, Y., JIAN, J., & YAO, S. Effect of oxidative torrefaction on high temperature combustion process of wood sphere. **Fuel**, v. 286, p. 119379, 2021.
- LIAO, L., ZHENG, J., ZHANG, Y., Li, C., & YUAN, C. Impact of torrefaction on entrained-flow gasification of pine sawdust: An experimental investigation. **Fuel**, v. 289, p. 119919, 2021.
- LINHARES, F. de A. de. **Avaliação fluidodinâmica e processo de co-combustão de resíduo de casca de acácia negra com carvão mineral em planta piloto de leito fluidizado borbulhante**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). UFRGS. 2016.
- LOURENÇO, A., ARAÚJO, S., GOMINHO, J., & EVTUGUIN, D. Cellulose Structural Changes during Mild Torrefaction of Eucalyptus Wood. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 2831, 2020.
- MACÊDO, L. A. de. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. Dissertação de Mestrado (Ciências Florestais). Unioeste. 2012.
- MCNAMEE, P., DARVELL, L. I., JONES, J. M., & WILLIAMS, A.. The combustion characteristics of high-heating-rate chars from untreated and torrefied biomass fuels. **Biomass and bioenergy**, v. 82, p. 63-72, 2015.

- MOLINARI, K. C. **Efeito da torrefação de pellets de Pinus taeda L. na produção de combustível de maior potencial energético**. 2017. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava -PR. 2017.
- MOYA, R.; TENORIO, C.; OPORTO, G. Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses as biofuel. **Energies**, v. 12, n. 4, p. 705, 2019.
- MUNDIKE, J.; COLLARD, F.-X.; GÖRGENS, J. F. Co-combustion characteristics of coal with invasive alien plant chars prepared by torrefaction or slow pyrolysis. **Fuel**, v. 225, p. 62-70, 2018.
- NHUCHHEN, D. R. Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis. **Fuel**, v. 180, p. 348-356, 2016.
- NIMLOS, M. N., BROOKING, E., LOOKER, M. J., & EVANS, R. J.. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer. **Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem**, v. 48, n. 2, p. 590-591, 2003.
- ONSREE, T.; JAROENKHASEMMEESUK, C.; TIPPAYAWONG, N. Techno-economic assessment of a biomass torrefaction plant for pelletized agro-residues with flue gas as a main heat source. **Energy Reports**, v. 6, p. 92-96, 2020.
- ONSREE, T.; TIPPAYAWONG, N. Analysis of reaction kinetics for torrefaction of pelletized agricultural biomass with dry flue gas. **Energy Reports**, v. 6, p. 61-65, 2020.
- OZONOH, M.; OBOIRIEN, B. O.; DARAMOLA, M. O. Optimization of process variables during torrefaction of coal/biomass/waste tyre blends: Application of artificial neural network & response surface methodology. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105808, 2020.
- PEREIRA, M. P. D. C. F., COSTA, E. V. S., PEREIRA, B. L. C., CARVALHO, A. M. M. L., CARNEIRO, A. D. C. O., & COSTA, A.. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.
- PÉREZ, J. F.; PELAEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M. Torrefaction of fast-growing Colombian wood species. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 6, p. 1655-1667, 2019.
- PINTO, F., GOMINHO, J., ANDRÉ, R. N., GONÇALVES, D., MIRANDA, M., VARELAA, F., & PEREIRA, H. Improvement of gasification performance of Eucalyptus globulus stumps with torrefaction and densification pre-treatments. **Fuel**, v. 206, p. 289-299, 2017.
- POHLMANN, J. G., BORREGO, A. G., OSÓRIO, E., DIEZ, M. A., & VILELA, A. C.. Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO2 mitigation environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 1-11, 2016.
- POHLMANN, J. G., OSÓRIO, E., VILELA, A. C., DIEZ, M. A., & BORREGO, A. G. Integrating physicochemical information to follow the transformations of biomass upon torrefaction and low-temperature carbonization. **Fuel**, v. 131, p. 17-27, 2014.
- POLLINGER-ZIERLER, B., SEDLMAYER, I., REINISCH, C., HOFBAUER, H., SCHMIDL, C., KOLB, L., ... & SIEGMUND, B. Interrelation of volatile organic compounds and sensory properties of alternative and torrefied wood pellets. **Energy & fuels**, v. 33, n. 6, p. 5270-5281, 2019.
- PROTÁSIO, T. D. P., BUFALINO, L., MENDES, R. F., RIBEIRO, M. X., TRUGILHO, P. F., & LEITE, E. R. D. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.
- PROTÁSIO, T. D. P., MELO, I. C. N. A. D., GUIMARÃES JUNIOR, M., MENDES, R. F., & TRUGILHO, P. F. Thermal decomposition of torrefied and carbonized briquettes of residues from coffee grain processing. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, p. 221-228, 2013.
- RASHID, S. R. M.; SAMAD, N. A. F. A.; SALEH, S. Upgrading Physicochemical Properties using Torrefaction Process and Anhydrous Weight Loss Modelling for Palm Mesocarp Fiber. **Materials Today: Proceedings**, v. 19, p. 1703-1711, 2019.
- RODRIGUES, C., WOICIECHOWSKI, A. L., LETTI, L., KARP, S. G., GOELZER, F. D., SOBRAL, K. C. A., ... & SOCCOL, C. R. Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial. **RESENDE, RR Biotecnologia aplicada à agro&indústria: fundamentos e aplicações**, v. 4, p. 283-314, 2016.
- ROMÃO, E. L.; CONTE, R. A. Energy gains of Eucalyptus by torrefaction process. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 23, 2021.

- ROMÃO, E. L.; DIAS, I. A. A influência da torrefação na moagem do Eucalyptus in natura e torrefeito para utilização como biocombustível. **Cadernos UniFOA**, v. 13, n. 37, p. 5-13, 2018.
- ROUSSET, P., FERNANDES, K., VALE, A., MACEDO, L., & BENOIST, A. Change in particle size distribution of Torrefied biomass during cold fluidization. **Energy**, v. 51, p. 71-77, 2013.
- SÁ, L. C., LOUREIRO, L. M., NUNES, L. J., & MENDES, A. M. Torrefaction as a pretreatment technology for chlorine elimination from biomass: A case study using Eucalyptus globulus Labill. **Resources**, v. 9, n. 5, p. 54, 2020.
- SALEMA, David. **Co-Combustão de Biomassa e Carvão em Leito Fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, Dioxinas e Furanos e Material Particulado**. Dissertação de Mestrado (Bioenergia). Lisboa: IST, 2008
- SANTOMASO, A.; LAZZARO, P.; CANU, P. Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 13, p. 2857-2874, 2003.
- SANTOS, M. C. B., DA SILVA, Y. B. R., MARTINS, M. T., SOARES, E. C. V., DE OLIVEIRA, F. D. B., DE MOURA, J. J., & DOS SANTOS, M. D. S. F. Aproveitamento de biomassa em uma indústria moveleira para geração de energia. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2020.
- SETKIT, N., LI, X., YAO, H., & WORASUWANNARAK, N. Torrefaction behavior of hot-pressed pellets prepared from leucaena wood. **Bioresource Technology**, v. 321, p. 124502, 2021.
- SILVA, Matheus Moraes. **Torrefação de biomassa residual proveniente da extração de óleo essencial de candeia**. Dissertação de Mestrado (Bioenergia). UFPR. 2015.
- SILVEIRA, E. A., DE MORAIS, M. V. G., ROUSSET, P., CALDEIRA-PIRES, A., PÉTRISSANS, A., & GALVÃO, L. G. O. Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 129, p. 29-36, 2018.
- SILVEIRA, E. A., GALVÃO, L. G. O., SÁ, I. A., SILVA, B. F., MACEDO, L., ROUSSET, P., & CALDEIRA-PIRES, A. Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of Eucalyptus grandis macro-particulates. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 5, p. 3645-3652, 2019.
- SELVEIRA, E. A., LUZ, S. M., LEÃO, R. M., ROUSSET, P., & CALDEIRA-OIRES, A. Numerical modeling and experimental assessment of sustainable woody biomass torrefaction via coupled TG-FTIR. **Biomass and Bioenergy**, v. 146, p. 105981, 2021.
- SIMONIC, M.; GORICANEC, D.; URBANCL, D. Impact of torrefaction on biomass properties depending on temperature and operation time. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140086, 2020.
- SINGH, R. K., JENA, K., CHAKRABORTY, J. P., & SARKAR, A. Energy and exergy analysis for torrefaction of pigeon pea stalk (cajanus cajan) and eucalyptus (eucalyptus tereticornis). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 38, p. 18922-18936, 2020.
- SINGH, R. K.; SARKAR, A.; CHAKRABORTY, J. P. Effect of torrefaction on the physicochemical properties of eucalyptus derived biofuels: estimation of kinetic parameters and optimizing torrefaction using response surface methodology (RSM). **Energy**, v. 198, p. 117369, 2020.
- SOARES, T. S., CARNEIRO, A. D. C., GONÇALVES, E. D. O., & LELLES, J. D. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, p. 1-9, 2006.
- VELICKO, A. J., DA SILVA, C. V., BESKOW, A., INDRUSIAK, M. L. S., & DE ERECHIM, C. Análise em CFD do Processo de Co-Combustão de Carvão Mineral com Biomassa Lenhosa: Influência da Umidade. **Perspectiva**, Erechim. v. 39, n.146, p. 09-26, 2015.
- XIAORUI, L.; LONGJI, Y.; XUDONG, Y. Evolution of chemical functional groups during torrefaction of rice straw. **Bioresource technology**, v. 320, p. 124328, 2021.
- YANG, K. C., WU, K. T., HSIEH, M. H., HSU, H. T., CHEN, C. S., & CHEN, H. W. Co-gasification of woody biomass and microalgae in a fluidized bed. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 44, n. 6, p. 1027-1033, 2013.
- YANG, X., LUO, Z., LIU, X., YU, C., & MA, Y. Experimental and numerical investigation of the combustion characteristics and NO emission behaviour during the co-combustion of biomass and coal. **Fuel**, v. 287, p. 119383, 2021.

ZHENG, A., FAN, Y., WEI, G., ZHAO, K., HUANG, Z., ZHAO, Z., & LI, H. Chemical looping gasification of torrefied biomass using  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  as an oxygen carrier for syngas production and tar removal. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 5, p. 6008-6019, 2020.

ZHENG, A., XIA, S., CAO, F., LIU, S., YANG, X., ZHAO, Z., & LI, H. Directional valorization of eucalyptus waste into value-added chemicals by a novel two-staged controllable pyrolysis process. **Chemical Engineering Journal**, v. 404, p. 127045, 2021.