



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Efeito da torrefação nos componentes e nas propriedades das espécies de madeira amazônica para fins energéticos

Por

Larissa Miyuki Gomes Mihara

Brasília, 4 de outubro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

Efeito da torrefação nos componentes e nas propriedades das espécies de madeira amazônica para fins energéticos

Por

Larissa Miyuki Gomes Mihara

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Edgar Amaral Silveira Dr. UnB/ENM _____

Armando de Azevedo Caldeira Pires, ENM/UnB _____

Simone Monteiro e Silva, ENM/UnB _____

Brasília 4 de outubro de 2022

Agradecimentos

Agradeço a Deus, cujas lições e caminhos me guiaram até aqui. Sem a mão dEle, nada teria sido conquistado. Agradeço a meus pais, meus professores da vida, que sempre me ampararam e que têm sido extremamente compreensivos com minhas ausências devido aos estudos, a eles, devo tudo. Sou grata a meus professores, que acompanharam minha jornada acadêmica e que contribuíram para que a etapa final da graduação fosse atingida. Sou grata aos amigos que fiz durante a graduação e que tornaram essa jornada tão mais fácil, obrigada por sempre estarem ao meu lado. Agradeço a todos que contribuíram, de maneira direta ou indireta, para a realização deste trabalho. Por fim, agradeço ao meu Orientador Edgar por me apresentar a um tema tão importante, pela paciência e pelos esforços sem medida para que eu conseguisse concluir este trabalho com êxito.

Resumo

A crescente demanda de energia renovável ao redor do mundo gera interesse pela exploração de matrizes sustentáveis que não apresentem desvantagens semelhantes às de recursos fósseis amplamente utilizados, como o fato de serem limitados, de difícil acesso e emissores de gases GHG (*Greenhouse gases*, também conhecidos como gases de efeito estufa). No Brasil, essas matrizes sustentáveis aparecem no formato de diversos tipos de biomassa. A prática de manejo florestal, por exemplo, bastante explorada no território brasileiro em função do interesse madeireiro na região amazônica, descarta toneladas de resíduos de biomassa lignocelulósica ao ano que, quando descartados de maneira indevida, causam problemas ambientais. Dessa forma, este trabalho estuda o aprimoramento de resíduos lignocelulósicos de manejo florestal através de tratamento térmico de torrefação e análise de espécies para fins de avaliação de uma alternativa ecológica às matrizes energéticas de origem fóssil. O trabalho segue uma linha de ação como explicado a seguir. Primeiramente, são coletadas, trituradas e peneiradas seis amostras de resíduos de diferentes espécies de madeira amazônica. Essas amostras são, então, caracterizadas e misturadas de forma a compor um blend, que será o primeiro objeto de estudo da presente pesquisa. Em seguida, o blend formado é submetido a três temperaturas de torrefação: 225°C, 250°C e 275°C, caracterizando assim uma torrefação leve, uma moderada e uma severa. Dessa etapa, são extraídas as análises imediata, elementar e calorimétrica da biomassa torrefada. A partir disso, são feitas as análises de resultados e conclusões acerca da questão principal do estudo, que avalia a aptidão da madeira à queima como combustível sólido de qualidade. Posteriormente, são contemplados processos de otimização da amostra de biomassa através das análises de decisões multi-critério e de distância métrica. Então, o blend de biomassa adquirido pelas análises de otimização se torna o segundo objeto de estudo deste trabalho e é submetido a 5 temperaturas de torrefação (200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C) com a finalidade de obter um espectro mais amplo acerca do comportamento e da severidade de torrefação associada. Finalmente, os resultados das torrefações foram obtidos e comparados àqueles do primeiro blend estudado para constatar a superioridade de suas características. Neste projeto de graduação, foi possível obter resultados que mostram que i) as amostras torrefadas apresentam maiores valores de poder calorífico, com 24,03 MJ/kg como o maior valor de PCS, atingido na torrefação severa do blend otimizado; ii) há maior degradação de hemicelulose a temperaturas mais altas de torrefação; iii) as amostras torrefadas à 275°C e 300°C apresentam as melhores

características como fonte de energia.

Palavras-chave: Torrefação, biomassa, TG, resíduos, madeira.

Abstract

The growing demand for renewable energy around the world generates interest in exploring sustainable matrices that do not have similar disadvantages to those of widely used fossil resources, such as the fact that they are limited, difficult to access and emit GHG (*Greenhouse gases*, also known as greenhouse gases). In Brazil, these sustainable matrices appear in the form of various types of biomass. The practice of forest management, for example, widely explored in the Brazilian territory due to the lumber interest in the Amazon region, discards tons of lignocellulosic biomass waste per year that, when improperly disposed of, cause environmental problems. Thus, this work studies the improvement of lignocellulosic residues from forest management through thermal treatment of torrefaction and species analysis for the evaluation of an ecological alternative to the energy matrices of fossil origin. The work is divided, mainly, into six stages. In the first stage, six samples of residues from different Amazonian wood species are collected, crushed and screened. These samples are then characterized and mixed to form a blend, which will be the first object of study of this research. The second step consists in submitting the blend formed to three torrefaction temperatures: 225°C, 250°C and 275°C, thus characterizing a light, moderate and severe torrefaction. From this step, the immediate, elemental and calorimetric analyses of the torrefied biomass are extracted. The third step is the analysis of results and conclusions about the main question of the study, which evaluates the suitability of wood for burning as a solid fuel of quality. In the fourth step, optimization processes of the biomass sample are contemplated through multi-criteria and metric distance decision analysis. In the fifth step, the biomass blend acquired by the optimization analyses becomes the second object of study of this work and is submitted to 5 torrefaction temperatures (200°C, 225°C, 250°C, 275°C and 300°C) in order to obtain a broader spectrum of its behavior and associate it with torrefaction severity. In the sixth and last step, the results of the torrefactions were obtained and compared to those of the first blend studied to verify the superiority of its characteristics. In this graduation project, it was possible to obtain results that show that i) the torrefied samples present higher calorific value values, with 24.03 MJ/kg as the highest PCS value, reached in the severe torrefaction of the optimized blend; ii) there is a greater degradation of hemicellulose at higher torrefaction temperatures; iii) the samples torrefied at 275° and 300°C present the best characteristics as an energy source.

Keywords: Torrefaction, biomass, TG, residues, wood.

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapeamento de palavras-chave.	4
Figura 2 – Mapeamento de autores.	5
Figura 3 – Composição da biomassa utilizada.	8
Figura 4 – Análise de Dominância.	14
Figura 5 – Análise de Distância Métrica.	15
Figura 6 – Fluxograma do trabalho.	17
Figura 7 – Formação do blend lignocelulósico.	18
Figura 8 – Sistema do reator com TGA-2000. (1)Cilindro de N ₂ , (2)Rotômetro de controle de gás, (3)TGA-2000, (4)Computador.	20
Figura 9 – Curvas e percentuais de perda de massa do blend inicial torrefado.	26
Figura 10 – Curvas de índice de severidade da torrefação do blend inicial.	27
Figura 11 – Componentes da análise imediata do blend inicial.	28
Figura 12 – Diagrama de van Krevelen para blend inicial <i>in natura</i> e torrefado.	29
Figura 13 – Espectros infravermelhos.	31
Figura 14 – Resultados da pirólise do blend inicial torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C.	32
Figura 15 – Formação do blend lignocelulósico otimizado.	33
Figura 16 – Curvas e percentuais de perda de massa do blend otimizado torrefado.	34
Figura 17 – Componentes da análise imediata do blend otimizado.	35

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Relação de palavras-chave utilizada.	4
Tabela 2 – Ocorrência de palavras-chave.	5
Tabela 3 – Espécies de madeira amazônica utilizadas no trabalho.	18
Tabela 4 – Critérios para análise de otimização do Blend.	23
Tabela 5 – Matriz submetida no MATLAB.	24
Tabela 6 – Poder calorífico superior das espécies de madeira e do blend <i>in natura</i>	25
Tabela 7 – Elementos e razões atômicas para espécies <i>in natura</i>	28
Tabela 8 – Elementos e razões atômicas para blend <i>in natura</i> e torrefado.	29
Tabela 9 – PCS das espécies de madeira <i>in natura</i> e do blend <i>in natura</i> e torrefado.	30
Tabela 10 – Incremento de poder calorífico dos blends torrefados.	30
Tabela 11 – Resultados de dominância métrica.	33
Tabela 12 – Comparação de PCS do blend e do blend otimizado torrefados.	35
Tabela 13 – Incremento do poder calorífico dos blends otimizados após torrefação.	36

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Caracterização do estudo	1
1.1.1	Cenário Energético Amazônico	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Análise Bibliométrica	4
1.4	Estrutura do trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Biomassa	7
2.1.1	Resíduos Lignocelulósicos	7
2.1.1.1	Características	8
2.1.1.2	Composição Química	10
2.1.1.3	Composição elementar	11
2.2	Tratamentos Térmicos	11
2.2.1	Pirólise	11
2.2.2	Torrefação	12
2.3	Otimização do Blend Lignocelulósico	13
2.3.1	Análise de Dominância	14
2.3.2	Análise de Distância Métrica	14
3	MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1	Blend de Biomassa	18
3.1.1	Preparo das Amostras	18
3.2	Torrefação	19
3.2.1	Parâmetros	19
3.2.2	Equipamento	19
3.2.3	Severidade de Torrefação	20
3.2.4	Análises	20
3.2.4.1	Análise Imediata	20
3.2.4.2	Análise Elementar	21

3.2.4.3	Análise Calorimétrica	22
3.2.4.4	FTIR do Produto Sólido	23
3.3	Otimização do Blend Lignocelulósico	23
3.3.1	Análise de Dominância	24
3.3.2	Análise de Distância Métrica	24
3.4	Torrefação do Blend Ótimo	24
4	RESULTADOS	25
4.1	Caracterização da Biomassa	25
4.2	Torrefação	25
4.2.1	Performance da torrefação	25
4.2.1.1	Rendimento Gravimétrico	25
4.2.1.2	Índice de Severidade de Torrefação	26
4.2.2	Análise do produto torrefado	27
4.2.2.1	Análise Imediata	27
4.2.2.2	Análise Elementar	28
4.2.2.3	Análise Calorimétrica	29
4.2.2.4	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier	30
4.3	Pirólise do produto torrefado	31
4.4	Otimização do Blend Lignocelulósico	32
4.5	Torrefação do Blend Ótimo	33
4.5.1	Performance da torrefação	33
4.5.1.1	Rendimento Gravimétrico	33
4.5.2	Análise do produto torrefado	34
4.5.2.1	Análise Imediata	34
4.5.2.2	Análise Calorimétrica	35
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	39

1 Introdução

1.1 Caracterização do estudo

Em face à necessidade de suprir a maior demanda de energia ao longo dos últimos anos, foi posta em evidência a impraticidade do alcance e da obtenção da matéria prima de combustíveis fósseis, além de seu caráter quimicamente nocivo e não sustentável devido a emissões de gases de efeito estufa. Diante disso, são avaliadas outras fontes de energia que cooperem com a frente desenvolvimentista renovável, em que se destacam as tecnologias *Waste to energy*, referentes ao processo de recuperação energética de resíduos que seriam, a priori, descartados, com o emprego de processos de conversão termoquímicos (como pirólise, torrefação e gaseificação) ou processos bioquímicos (CHEN; KUO, 2010); a biomassa (ou bioenergia) é a principal fonte a ser considerada devido a sua disponibilidade global, sua sustentabilidade e seu baixo custo e se mostra como uma fonte de energia de crescimento promissor nos próximos anos (PROSKURINA et al., 2017). A biomassa, devido ao fato de a liberação de dióxido de carbono durante sua utilização ser parte do ciclo do carbono, é também considerada como um combustível de carbono neutro (CHEN; PENG; BI, 2015). Em consequência desses e de outro motivos, a bioenergia representa cerca de 10% da procura de energia primária no mundo, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) (AGENCY, 2011).

Além disso, a biomassa em seu estado natural apresenta desvantagens em relação a matrizes energéticas de origem fóssil utilizadas em larga escala, são elas: alto teor de umidade, baixo poder calorífico, baixa densidade aparente e natureza higroscópica; essas características aferem maior custo e dificuldade aos processos de coleta, trituração, estocagem e transporte. A fim de reduzir esses problemas e aumentar a eficiência de conversão da biomassa, apresenta-se a torrefação, processo que vem ganhando grande relevância nos estudos de matriz energética ultimamente (ARAUJO et al., 2021; PROSKURINA et al., 2017; STREZOV; EVANS, 2015).

A torrefação é um processo de pré-tratamento térmico em que a biomassa é aquecida a temperaturas entre 200 e 300°C em um ambiente com pouca ou nenhuma oxigenação, adquirindo, em função disso, a nomenclatura de leve pirólise. Esse pré-tratamento tem como objetivo a conversão de biomassa em combustível sólido que gera calor e energia quando queimado (CHEN; PENG; BI, 2015). A biomassa torrefada pode derivar de quais-

quer tipos de biomassa sólida (LAMERS et al., 2016b) e, nos últimos anos, o processo de torrefação foi comercialmente disponibilizado para biomassa lignocelulósica (PROSKURINA et al., 2017), a qual representa a terceira fonte de energia mais utilizada no Brasil (SILVEIRA et al., 2018a). A implementação de um pré tratamento sobre a biomassa pura com o intuito de otimizar suas características para adaptação comercial seria então de grande contribuição para a diminuição dos impactos ambientais adversos causados pelo alto índice atual de emissão de CO_2 na atmosfera, aliando-se assim às metas decretadas pelo Protocolo de Kyoto (NATIONS, 1998).

Como resultado do processo de torrefação, obtém-se um produto homogêneo, de maior densidade e valor de aquecimento específico e menor umidade. Além disso, a biomassa torrefada possui natureza hidrofóbica, de modo que a degradação fúngica durante armazenamento se torna improvável (ARIAS et al., 2007).

No presente estudo será apresentado um processo experimental de torrefação de amostras de madeira amazônica abrangendo análises de TGA e FTIR de ambas composições sólida e química do corpo de prova para avaliação, através do método de Análise de Decisão Multi-Critério (EVARISTO et al., 2021), de melhorias e de otimizações em suas particularidades, com a finalidade de possibilitar a admissão em larga escala dessa biomassa como fonte de energia renovável de alto potencial competitivo face ao carvão.

1.1.1 Cenário Energético Amazônico

Na região norte do país há muitos sistemas isolados de geração de energia elétrica baseados em matrizes não renováveis. Em 2020, de um total de 263 sistemas isolados em território brasileiro, mais de 200 eram termoeletricas concentradas na região amazônica que só produziam energia para uma determinada região localizada perto de sua construção (EPE, 2021). Isso ocorre em consequência da falta de interligação territorial, da sensibilidade ambiental e da existência de comunidades pequenas e dispersas. Essas termoeletricas vastamente presentes no norte do país são movidas a óleo diesel, um grande emissor de CO_2 (EPE, 2018). Em função do potencial de substituição ao óleo diesel que apresentam os resíduos de manejo florestal, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) tem almejado, nos últimos anos, dar maior visibilidade científica, política e comercial a eles. Uma vez que a região amazônica é vítima de alta taxa de extrativismo de seus recursos naturais, os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável se tornam uma fonte promissora de bioenergia (FOX, 1977; POSEY, 1983).

De acordo com as instruções normativas estaduais de manejo florestal, é estabelecido que empresas na Amazônia podem tirar até $30m^3$ de toras de árvore por hectare, ou seja, da parte da árvore que é comumente utilizada para fins comerciais; a galhada além da tora é considerada resíduo e seu descarte na floresta é desfavorável para a regeneração da plantação em função do longo tempo necessário para decomposição em função de sua alta densidade e de constituírem riscos de incêndios florestais (HOMMA, 2003; HOMMA,

2007). Para cada tonelada de madeira extraída sob regime de Exploração de Impacto Reduzido, são gerados por volta de 2,13 toneladas de resíduos (NUMAZAWA et al., 2017). O transporte desses resíduos tem alto custo e 70% deles vira gases e 5-10% vira cavaco de madeira, por isso, são feitos estudos que visam maximizar o uso do resíduo para aumentar o rendimento da conversão em carvão vegetal por forno (LIMA, 2020).

Os extrativismos e as colheitas chamados de "regimes de impacto reduzido" consistem no abandono da terra para propiciar a regeneração natural e geram trabalho para os dispersores de sementes florestais presentes no ambiente, bióticos e abióticos, favorecendo esse processo repositivo de vegetação, que pode ou não ocorrer logo após a colheita (ZANETTI, 2012). Cada período de colheita a colheita, passando pelo reflorestamento natural, é chamado de ciclo. Os sistemas que englobam esse período podem ser denominados monocíclicos ou policíclicos, sendo aplicados, respectivamente, em florestas uniformes onde existem classes de idades (de árvores) e em florestas com diferentes idades.

Com relação à produção de carvão vegetal na região Norte, os estados do Maranhão e Pará (região do Carajás) comportam o segundo maior polo siderúrgico do Brasil (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008). Na região, o fornecimento de carvão vegetal é oriundo de reflorestamentos com espécies do gênero *Eucalyptus* e resíduos do manejo florestal. Contudo, os plantios comerciais no Estado do Pará ainda são incipientes, cerca de 137.866 hectares ou 2,4% da área total plantada dessas espécies no Brasil (IBA, 2019). Dada a insuficiência de madeira oriunda de reflorestamento, destaca-se que a utilização dos resíduos do manejo florestal certificado para produção de carvão vegetal é promissora, contudo, esses têm sido utilizados sem segregação. Informações das propriedades colorimétricas, físicas, químicas e energéticas dessas biomassas são importantes para dar suporte a segregação dessas madeiras, aumentar a eficiência de conversão energética e reduzir a heterogeneidade das madeiras utilizadas nos processos termoquímicos.

1.2 Objetivos

Este trabalho é produto da continuação de um projeto de pesquisa submetido em outubro de 2021, intitulado "Aprimoramento Energético de Resíduos Lignocelulósicos por Torrefação", feito pelo Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) da Universidade de Brasília em parceria com o Laboratório de Produtos Florestais (LPF-SFB) e tem por objetivo principal o estudo da viabilidade energética de um biocombustível composto por resíduos lignocelulósicos provenientes do manejo florestal de espécies lenhosas amazônicas.

Para alcançar essa finalidade, são impostos dois objetivos específicos: a melhora das características da biomassa através da torrefação e otimização do blend lignocelulósico via Análise de Decisão Multi-critério. Para atingir esses objetivos específicos, são coletadas e tratadas amostras de algumas espécies lenhosas amazônicas. Essas amostras são misturadas para a formação de um blend e submetidas ao processo de tratamento

térmico de torrefação, sob o qual são executadas as mais diversas análises de eficiência energética do processo e da biomassa torrefada.

Além disso, ainda são realizadas análises de dominância e de distância métrica com a finalidade de otimizar o blend lignocelulósico utilizado como material de estudo para, assim, identificar o conjunto ótimo de espécies de madeira dentre as estudadas para que se obtenha o melhor produto sólido de torrefação.

1.3 Análise Bibliométrica

Para a formação de um referencial bibliográfico acerca do assunto abordado nesta pesquisa, foi realizada uma análise sistêmica da literatura empregando o método *Knowledge Development Process – Constructivist (Proknow-C)* ((AFONSO et al., 2011)) através da ferramenta de pesquisa *Web of Science (Clarivate Analytics)*, que retorna artigos alinhados com o tema em estudo através de palavras-chave e autores que, por sua vez, são submetidos a uma análise quantitativa executada pelo programa *VosViewer*®. As palavras-chave de entrada para a busca do referencial bibliográfico estão expostas na tabela 1 e foram selecionadas a partir das questões centrais (biomassa, torrefação) que o estudo envolve e seus termos mais estreitamente relacionados (TGA, madeira, energia).

Tabela 1 – Relação de palavras-chave utilizada.

Busca	Palavras-chave
1	Biomass + biofuel + torref*
2	Biomass + Pellet + wood + torref*
3	TGA + biomass + torref*
4	Torref* + Biofuel + Energy yield

Através dessas buscas no Web of Science foram retornados 940 artigos que, após aplicação do método do Proknow-C, foram reduzidos para 72 artigos. Após esse refinamento de títulos, o mapeamento das palavras-chave mais relevantes (Figura 1) e autores mais recorrentes (Figura 2) foi possível através do software *Vosviewer*.

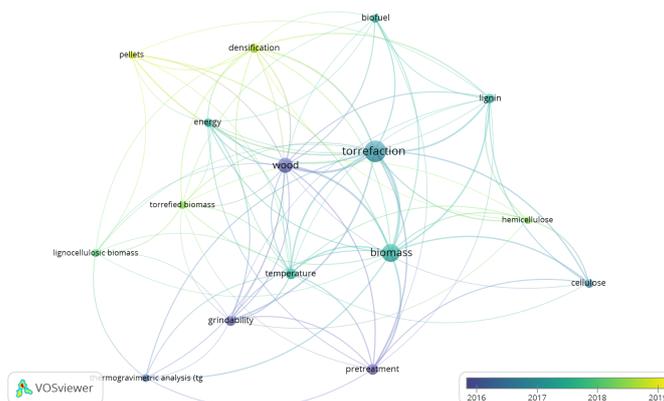


Figura 1 – Mapeamento de palavras-chave.

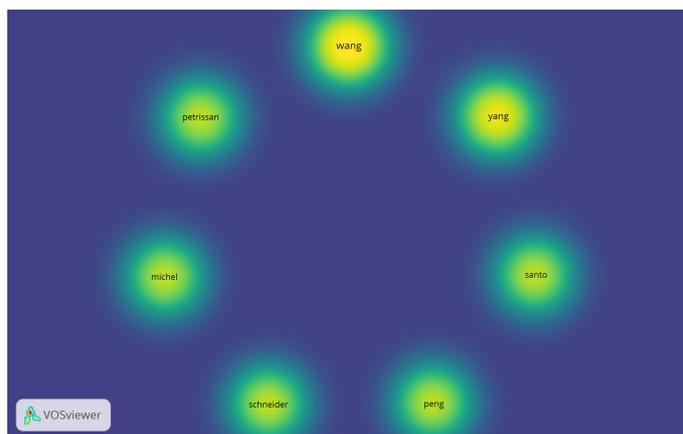


Figura 2 – Mapeamento de autores.

A Tabela 2 explicita a magnitude das ocorrências de algumas das palavras-chave mais relevantes expostas no mapeamento da Figura 1; segundo ela, a palavra mais ocorrente é torrefação.

Tabela 2 – Ocorrência de palavras-chave.

Palavras-chave	Ocorrência
torrefaction	43
biomass	31
wood	22
pretreatment	11
temperature	11
grindability	10

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado como segue. O capítulo 2 apresenta uma breve explicação dos cenários e conceitos abordados ao longo do desenvolvimento da presente pesquisa. O capítulo 3 apresenta as etapas experimentais do estudo e como foram conduzidas, assim como a maneira com que foram executadas as análises das amostras de resíduos lignocelulósicos. Os resultados desses ensaios laboratoriais realizados ao longo do projeto e as discussões acerca deles são apresentados no capítulo 4. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Biomassa

No Brasil, em 2018, a energia proveniente da biomassa representou 9% de toda a energia elétrica produzida no país (IBGE, 2021). A biomassa é, de maneira geral, considerada como qualquer matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, passível de ser convertida em energia. Para efetuar essa transformação, são empregados os métodos de conversão termoquímica, conversão bioquímica e combustão direta (SHALINI et al., 2020). Os componentes principais da biomassa são: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e material residual (A) (GOMES, 2010).

A biomassa é um recurso renovável que, além de se encontrar disponível em abundância globalmente, é considerado um combustível de carbono neutro (SAIDUR et al., 2011), ou seja, quando queimado, emite a mesma quantidade de CO_2 na atmosfera que é retirada pela fotossíntese para completar o ciclo de vida das plantas. Além disso, esse recurso representa uma ótima solução alternativa para o transporte de combustíveis fósseis líquidos.

A matéria orgânica em questão pode ser utilizada em seu estado puro para geração de energia, no entanto, a possibilidade de otimização de suas propriedades e, principalmente, do seu poder calorífico através das vias de conversão supramencionadas aliada ao seu grande potencial de aproveitamento e fácil acesso, contribuiu para a intensificação do interesse nos estudos biotecnológicos relacionados a ela (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014; LU et al., 2011; VILASBOAS et al., 2010).

2.1.1 Resíduos Lignocelulósicos

Resíduos são considerados como qualquer material descartado durante execução de atividade produtiva; o manejo florestal, por exemplo, é uma prática legalizada amplamente utilizada em território amazônico e seus refugos, dados pela porção das árvores que não é utilizada (tudo o que não é tora), podem ser utilizados na produção de biocombustíveis através tratamentos de conversão de biomassa em gás ou combustível líquido, o que, além de reduzir custos e riscos de produção espontânea de lixiviados, metano, dióxido de carbono e outros poluentes por descarte indevido (NUMAZAWA et al., 2017), ainda

agrega valor aos resíduos lenhosos (LIMA, 2020). Por estimativa da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), essa biomassa corresponde a 6% da biomassa utilizada no Brasil em 2050 (EPE, 2018).

A biomassa lignocelulósica se denomina dessa forma devido a sua composição majoritária de celulose, hemicelulose e lignina. O percentual de cada constituinte depende da espécie da biomassa. Ainda estão presentes, em menor parcela, extrativos orgânicos e minerais inorgânicos (cinzas). O esquema de composição da biomassa utilizada no presente trabalho (madeira) é como ilustrado na Figura 3.

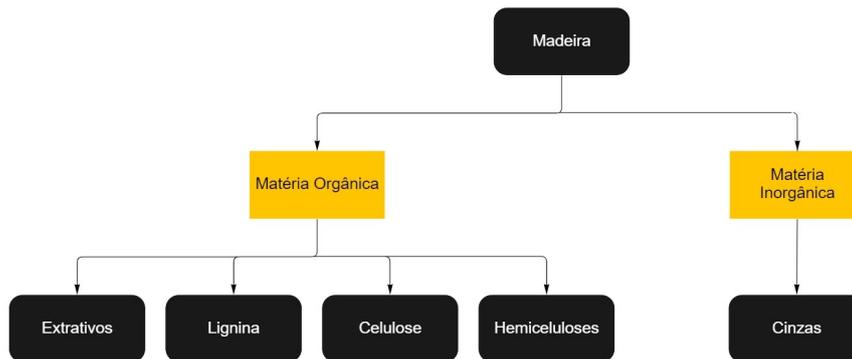


Figura 3 – Composição da biomassa utilizada.

2.1.1.1 Características

A biomassa de madeira em seu estado natural apresenta algumas características que têm um impacto considerável no rendimento energético dos processos de pré-tratamento térmico, uma vez que é submetida a eles. Essas características são os teores de umidade e de densidade, e variam de acordo com a espécie lenhosa em análise.

A umidade contida em uma amostra de madeira determina a aplicabilidade dessa amostra. Tecnologias de processamento bioquímico apresentam predileção por espécies com um maior teor de umidade, já as tecnologias de processamento térmico (combustão, pirólise, torrefação e gasificação) se restringem a exemplares que contam com menos de 40% de umidade (KENNEY; SENNERBY-FORSSE; LAYTON, 1990). Isso se deve ao fato de que níveis elevados de umidade em um combustível acarretam maior gasto energético durante sua secagem e sua queima (CHEN; PENG; BI, 2015; SILVA, 2019) o que diminui o rendimento gravimétrico do procedimento, pois parte da biomassa é queimada para remoção da umidade, o que, por sua vez, diminui o poder calorífico associado e aumenta a friabilidade do carvão (ROUSSET et al., 2011), definida pela capacidade de se transformar em finos (subproduto poroso) quando submetido a impacto que gere quebras ou abrasão (GOMES; OLIVEIRA, 1980). Além dessas desvantagens, altas taxas de umidade ainda se mostram economicamente desfavoráveis pois aumentam o custo de transporte da biomassa pelo maior peso agregado (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997).

A madeira, logo após ser derrubada, apresenta alto teor de umidade associada. Sendo assim, em função dos fatores supramencionados, para que a biomassa seja considerada apta a uso energético, é necessário que seja submetida a um processo de secagem até que atinja valores inferiores a, aproximadamente, 15% de umidade no caso de produção de gás e 10% de umidade no caso de pirólise (CHEN; PENG; BI, 2015). Dentre as vantagens que fornece a madeira de baixa umidade, se destaca a facilidade de estocagem por longos períodos devida ao baixo risco de deteriorização do material por proliferação fúngica (LIPINSKY J. R. ARCATE, 2002).

A biomassa de madeira apresenta dois conceitos de densidade. A densidade básica, assim como o teor de umidade, é uma propriedade que determina a finalidade da madeira e que também depende da espécie lenhosa analisada e suas características químicas e estruturais (COSTA, 2006; FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971). A densidade básica é tida como a razão entre a massa anidra (completamente seca, a 0% de umidade) da madeira e seu volume completamente saturado de água (ou volume verde) (PANSHIN; ZEEUW, 1980) e difere da densidade aparente pois essa se dá pela razão entre massa e volume sob as mesmas condições de umidade (REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988). A medição prática da densidade aparente, no entanto, pode posar problemas devido a dificuldade de se determinar com exatidão o volume da madeira a 0% de umidade, em função da adsorção imediata de umidade assim que é retirada da estufa de secagem; logo, com o objetivo de obter resultados mais precisos, determina-se a densidade aparente básica da madeira através da relação entre massa seca e volume úmido da madeira (MORESCHI, 2005).

Em um âmbito de reaproveitamento de resíduos de manejo florestal, que são compostos especialmente pela galhada descartada, a questão da análise de densidade aparente básica da madeira se torna ainda mais pertinente, pois estudos comprovam que há diferença de densidade básica em função da parte da planta que está sendo aproveitada. Em média, a densidade do tronco é maior do que a densidade dos galhos, em razão da maior proporção de lenho jovem presente neles (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013). Além disso, o perfil da planta também se mostra relevante sob esse aspecto, uma vez que a árvore que apresenta bifurcações e espaçamento dispõe de menor densidade (BARROS-JUNIOR et al., 2022).

Ademais, a madeira de densidade aparente básica elevada apresenta, geralmente, menor teor de umidade (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013). Além disso, o uso de madeiras de altas densidades para fins energéticos apresenta outras vantagens, tais quais: maior rendimento energético no transporte, necessidade de menor área de estocagem e manuseio da madeira, maior rendimento das caldeiras para queima direta da madeira e maior rendimento dos reatores para hidrólise ácida (PEREIRA et al., 2000). Madeiras que apresentam densidade aparente básica elevada são utilizadas na produção de carvão vegetal, pois a alta densidade da matéria prima garante a produção de carvão com alto rendimento gravimétrico, alto teor de carbono fixo e maior densidade aparente do carvão,

resultando em um produto energético de alta qualidade (SILVA, 2019).

2.1.1.2 Composição Química

A celulose, um polímero glucosano, é o componente presente em maior quantidade na biomassa e compõe de 40 a 45% de sua massa seca (STREZOV; EVANS, 2015; SILVA, 2019). Ela constitui a maior parte da parede celular e tem o papel de manter a estrutura da planta. A celulose possui estruturas cristalinas e amorfas que podem ser expressas por $(C_6H_{10}O_5)_m$, em que o subscrito m é o grau de polimerização.

A hemicelulose, também chamada de poliose, compõe de 20 a 30% da massa seca da madeira (SJOSTROM, 1993). Ela é uma mistura ramificada de vários polímeros, tais quais: xilose, glucose, manose, galactose, arabinose e ácido glucurônico (STREZOV; EVANS, 2015) e sua estrutura básica pode ser representada por $(C_5H_8O_4)_m$. As hemiceluloses, em função de sua estrutura amorfa, são consideradas mais instáveis termicamente quando comparadas à celulose (MARTINS, 1980).

A lignina é uma substância polifenólica tridimensional cuja estrutura, em virtude de seu alto grau de ramificação e de suas unidades amorfas de fenilpropano, é demasiadamente complexa (STREZOV; EVANS, 2015). Seu percentual na biomassa é, geralmente, de 20 a 25% (SJOSTROM, 1993) e pode ultrapassar os 30% a depender da região da qual é proveniente (GOMIDE et al., 2005). Sua fórmula é dada por $[C_9H_{10}O_3.(OCH_3)_{0.9-1.7}]_m$. Estudos apontam que, durante a carbonização, a lignina é o componente que mais contribui para a produção de carvão vegetal, seguida pela celulose e, por fim, pelas hemiceluloses (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006; OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1984).

Devido à composição de cada uma delas, essas estruturas possuem temperaturas de decomposição térmica diferentes. Enquanto a lignina apresenta degradação gradual a temperaturas de 160° a 900°C, a hemicelulose decompõe no intervalo de 220 a 315°C e a celulose de 315 a 400°C (CHEN; PENG; BI, 2015).

Os extrativos orgânicos são identificados como os compostos químicos remanescentes que não fazem parte da estrutura da madeira. Esses extrativos são encontrados em maior quantidade na casca e em menor quantidade no cerne da madeira (MARTINS, 1980). Alguns desses componentes são: óleos, gorduras, ceras, entre outros tipos de compostos orgânicos (ROWELL, 2004).

Os minerais inorgânicos, também conhecidos como cinzas, são provenientes dos tratamentos térmicos que envolvem a combustão completa da biomassa lignocelulósica. Se tratam de óxidos minerais que não contribuem para a formação de produto energético, sendo inconvenientes nos processos de conversão da biomassa. As cinzas compõem de 0,2 a 1% da massa seca da madeira (BRITO; BARRICHELO, 1979).

2.1.1.3 Composição elementar

Os principais elementos químicos constituintes dos resíduos lignocelulósicos e seus respectivos percentuais são: carbono (C) a 50%, oxigênio (O) a 43%, hidrogênio (H) a 6%, nitrogênio (N) a 0,5% e enxofre (S) a 1-6% (NEVES, 2012; CHEN; PENG; BI, 2015; STREZOV; EVANS, 2015). O carbono é a maior fonte do calor liberado durante a combustão, por isso, é desejável que um combustível possua altos níveis de carbono (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004). O hidrogênio também é de grande importância para a liberação de calor durante a queima do combustível, em contrapartida, maiores proporções de hidrogênio são comumente acompanhadas por menores proporções de carbono (CHEN; PENG; BI, 2015). O oxigênio contido na biomassa propicia o processo de queima, contudo, maiores quantidades de oxigênio implicam menor retenção de carbono, o que acarreta em menor poder calorífico associado à matéria-prima (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004). A nível molecular, durante conversão térmica, ligações carbono-carbono contém maior energia a ser liberada do que ligações carbono-oxigênio e carbono-hidrogênio (MCKENDRY, 2002), por isso, é preferível uma maior quantidade residual de carbono ao fim de tratamentos térmicos do que de hidrogênio, outro elemento que atua como importante fonte de calor durante queima de combustível. O enxofre e o nitrogênio definem a qualidade ambiental do combustível, altas taxas desses componentes são indesejadas porque produzem gases acidulados durante queima e mau cheiro durante conversão bioquímica (STREZOV; EVANS, 2015).

Em comparação ao carvão, combustível fóssil não renovável com o qual é frequentemente comparada, a biomassa apresenta menores quantidades de carbono, nitrogênio, enxofre e cinzas (VOCA et al., 2016), e maiores quantidades de hidrogênio e oxigênio. Na biomassa *in natura* os valores das razões atômicas O/C e O/H estão entre 0,4-0,8 e 1,2-2,0, respectivamente. Os componentes químicos da biomassa possuem razões atômicas próprias e seus valores são maiores na celulose, menores na hemicelulose e, por fim, ainda menores na lignina (CHEN; PENG; BI, 2015).

2.2 Tratamentos Térmicos

2.2.1 Pirólise

A pirólise consiste em um processo de decomposição térmica de material orgânico sob atmosfera deficiente de oxigênio e se destaca dentre outros processos de tratamento por gerar produtos (líquidos, sólidos e gasosos) que podem ser usados não só como fonte de combustível, mas com vários outros fins de interesse ecológico (PEDROSA, 2011). Os produtos principais da pirólise são bio-óleo, gás e carvão vegetal. O gás proveniente da pirólise pode ser usado como combustível, o bio-óleo, além de ser um combustível líquido de alto rendimento, ainda pode ser utilizado na produção de químicos (GUEDES et al.,

2010) e o carvão vegetal pode ser queimado como combustível, utilizado na produção de carvão ativado ou descartado de forma segura (KORKMAZ et al., 2009).

A pirólise da biomassa tem como objetivo otimizar o ciclo produtivo ao atribuir eficiência energética ao produto residual sólido submetido ao processo e tem sido bastante estudado ao longo dos anos para análise de composição do produto pirolisado (FELIX et al., 2017), que muda em função da composição da amostra, do tipo de reator que executa o processo, da taxa de aquecimento, da temperatura e do tempo de residência das fases sólida e líquida (SILVA, 2019; VELGHE et al., 2011). Esses parâmetros também caracterizam a pirólise em dois tipos de procedimento: pirólise lenta e pirólise rápida.

A pirólise lenta, também chamada de carbonização, tem uma temperatura máxima de 500°C (T.WILLIAMS; BESLER, 1996), tempo de residência elevado em comparação à pirólise rápida e taxa de aquecimento de menos de 2°C/s (VIEIRA et al., 2014) e queima lentamente a biomassa, priorizando a produção de carvão vegetal (produto sólido) com baixo ou moderado nível de bio-óleo (produto líquido) (STREZOV; EVANS, 2015; VIEIRA et al., 2011).

Em contrapartida, a pirólise rápida provoca um contato muito rápido da biomassa com temperaturas muito altas: usualmente de 500°C a 520°C (BRIDGWATER; MEIER; RADLEINC, 1999). Esse procedimento apresenta tempo de residência de 30ms a 1,5s e taxa de aquecimento na faixa de 1000°C/s a 10.000°C/s (MAGGI; DELMON, 1994). Esse processo, distintivamente à pirólise lenta, tem como objetivo produzir altos níveis de bio-óleo (MEIER; FAIX, 1999) e baixos níveis de carvão e gás. Para esse tipo de pirólise, observa-se um melhor rendimento na recuperação de co-produtos (carvão e gás) e baixo impacto ambiental (PANNIRSELVAM, 2005).

O impacto da pirólise nos componentes da biomassa lignocelulósica se dá de maneira variada em função da estrutura de cada um deles. A hemicelulose possui a temperatura mais baixa de decomposição (entre 200°C e 260°C) e produz, através da pirólise, ácido acético, furfural e furano. A celulose começa seu decaimento logo em seguida (entre 240°C e 350°C) e tem como produtos principais formaldeído, hidroxiacetaldeído, acetol, levoglucosano e 5-hidroximetilfurfural. Por fim, tem início a degradação da lignina (entre 280°C e 500°C) que, devido à sua complexidade estrutural, forma uma grande variedade de produtos, tais quais fenóis monoméricos e fragmentos oligoméricos, e a fração mais pesada do bio-óleo, formada por fenol, seus derivados e produtos oligoméricos (PARADELA, 2012).

2.2.2 Torrefação

A torrefação, também chamada de pirólise branda, é um processo de pré-tratamento térmico que ocorre em ambientes com a presença de pouco ou nenhum oxigênio (com o nitrogênio como gás comumente utilizado para garantir uma atmosfera inerte (CHEN;

PENG; BI, 2015)) a temperaturas que chegam até 200-300°C a taxas de aquecimento menores que 50°C/min (BERGMAN; KIEL, 2005; PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006). Esse procedimento pode ser classificado, a depender da temperatura máxima que alcança, como torrefação leve (200-235°C), moderada (235-275°C) e severa (275-300°C) (CHEN; KUO, 2011a). Quanto maior a temperatura final da torrefação, maior a quantidade de voláteis sendo emitidos ao longo da decomposição da hemicelulose, da celulose e da lignina (PROSKURINA et al., 2017).

Durante a torrefação, cada componente da biomassa dá início a sua degradação térmica a uma temperatura diferente, como dito na seção 2.2.1. Posto isso, tem-se que na torrefação leve, além da umidade e de voláteis de baixo peso molecular serem liberados, a hemicelulose é o componente mais afetado em termos de decaimento sólido, enquanto a celulose e a lignina são afetadas de maneira insignificante (ROUSSET et al., 2011). Na torrefação moderada, os níveis de decaimento dos componentes químicos e de voláteis se acentuam e a celulose é afetada também. Já na torrefação severa, a hemicelulose é quase completamente degradada, a celulose é bastante oxidada e há também uma pequena despolimerização da lignina. Dado que a hemicelulose e a celulose compõem a maior parte da parede celular da biomassa, há considerável perda de massa durante o processo de torrefação (CHEN; PENG; BI, 2015).

Esse processo de degradação térmica é permitido para qualquer tipo de material orgânico sólido (LAMERS et al., 2016a) e seu produto principal é a biomassa torrefada (SOPONPONGPIPAT; SAE-UENG, 2015). Os objetivos da torrefação residem na melhoria das características naturais da biomassa, logo, o produto torrefado esperado dispõe de maior poder calorífico através do aumento de carbono fixo, menores razões atômicas O/C e H/C e menor teor de umidade por serem liberados logo na secagem e nos estágios iniciais da torrefação, caráter hidrofóbico devido à destruição parcial de grupos hidroxil no decorrer do processo de desidratação (YAN et al., 2009), moagem facilitada (ARIAS et al., 2007; DENG et al., 2009) e propriedades mais uniformes.

As melhorias proporcionadas pela torrefação tornam a biomassa adequada para combustão e gaseificação. Estudos apontaram que as propriedades da biomassa torrefada são equiparáveis às do carvão e, por isso, ela se torna passível de uso não somente em processos de queima de combustível, como também em determinadas aplicações industriais (PROSKURINA et al., 2017).

2.3 Otimização do Blend Lignocelulósico

A otimização do blend de madeira residual formado pode ser conduzida de várias maneiras, tendo em vista que existem várias soluções para a melhora das características físico-químicas da biomassa, sendo assim, impossível a obtenção global de uma solução que atende a todas as demandas e se fazendo necessária a implementação do método de

análise multi-critério a fim de obter uma solução mais satisfatória (EVARISTO et al., 2021). Sendo assim, os métodos de decisão a serem implementados neste trabalho serão: Análise de Dominância e Análise de Distância Métrica.

2.3.1 Análise de Dominância

A análise de dominância surge através da necessidade de estabelecer uma dominância de certo critério sobre outros concorrentes a esse quando existem várias soluções que priorizam um parâmetro em detrimento de outro. A premissa de dominância é a seguinte: em um espaço de N soluções de um problema com p critérios de decisão, uma solução x_1 domina uma solução x_2 se e somente se x_1 não é pior do que x_2 em todos os critérios e x_1 é estritamente melhor do que x_2 em pelo menos um critério. Essa premissa está demonstrada na Equação 2.1.

$$x_1 \leq x_2 \quad \text{iff} \quad \begin{cases} f_i(x_1) \leq f_i(x_2) & \forall i \in 1, \dots, p \\ \exists j \in 1, \dots, M & f_j(x_1) < f_j(x_2). \end{cases} \quad (2.1)$$

Essa análise de decisões se concentra em um conjunto de soluções contendo as melhores soluções, ou seja, aquelas que não são dominadas por nenhuma outra de acordo com a premissa supracitada; essas soluções se encontram na denominada frente de Pareto (FERREIRA; RIBAU; COSTA, 2020). A esquematização gráfica da análise de dominância está ilustrada na Figura 4.

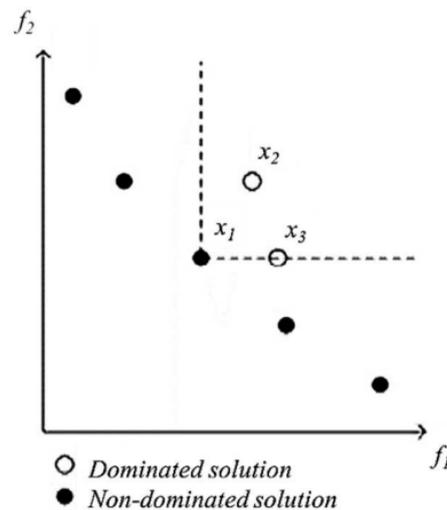


Figura 4 – Análise de Dominância.

2.3.2 Análise de Distância Métrica

O método de análise de distância métrica funciona através do método de *compromise programming*, ou programação de compromisso. Esse método prioriza soluções

que se encontram mais perto (em termos de distância) da solução numérica desejada ou mais longe da solução indesejada (DEB, 2001). Essa avaliação é feita através do vetor de distância euclidiano e a distância métrica (d_n) entre uma solução e o ponto de referência é dada pela Equação 2.2.

$$d_n = \left[\sum_{m=1}^M |f_m(x_n) - z_m|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2.2)$$

Em que $f_m(x_n)$ é o valor da solução n no critério m , z_m é o resultado da solução referência no critério m , p é o número de critérios e M é o número de soluções. O ponto de referência é específico para cada critério e se dá pelos valores preferidos de cada um dos produtos.

O esquema de análise de distância métrica está ilustrado na Figura 5, na qual o "X" marca o ponto de referência métrica a todos os outros pontos plotados.

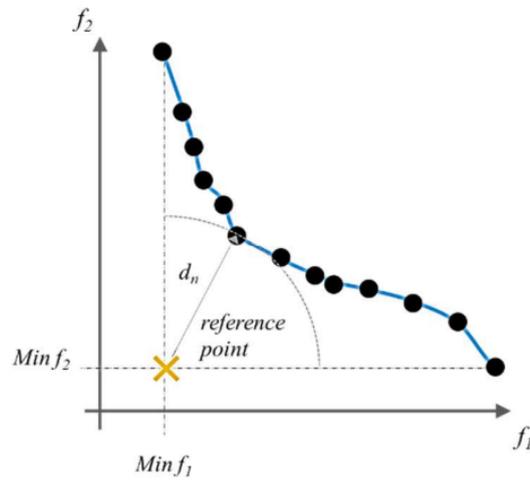


Figura 5 – Análise de Distância Métrica.

3 Material e Métodos

A metodologia deste trabalho está detalhada no fluxograma ilustrativo dado pela Figura 6. Em um panorama geral, é possível dividir o trabalho em três fases: embasamento teórico, procedimento experimental e conclusões. Na fase do embasamento teórico, é feito um estudo bibliométrico, como explicado na seção 1.3.

A partir disso, é estabelecido o referencial bibliográfico que é formado por estudos similares e fornece informações já concretas acerca do assunto em questão. Em seguida, a fase de procedimento experimental compreende a elaboração do blend de biomassa lignocelulósica e todos os testes feitos em laboratório que foram necessários para a obtenção dos resultados desta pesquisa, que consistem, principalmente, nos valores de poder calorífico e de rendimento sólido obtidos para cada temperatura de torrefação de cada blend submetido a esse processo. Por fim, as conclusões consistem na análise desses resultados e compilação de informações relevantes ao objetivo principal do trabalho, que é o aprimoramento de diversas características da biomassa residual de manejo florestal amazônico.

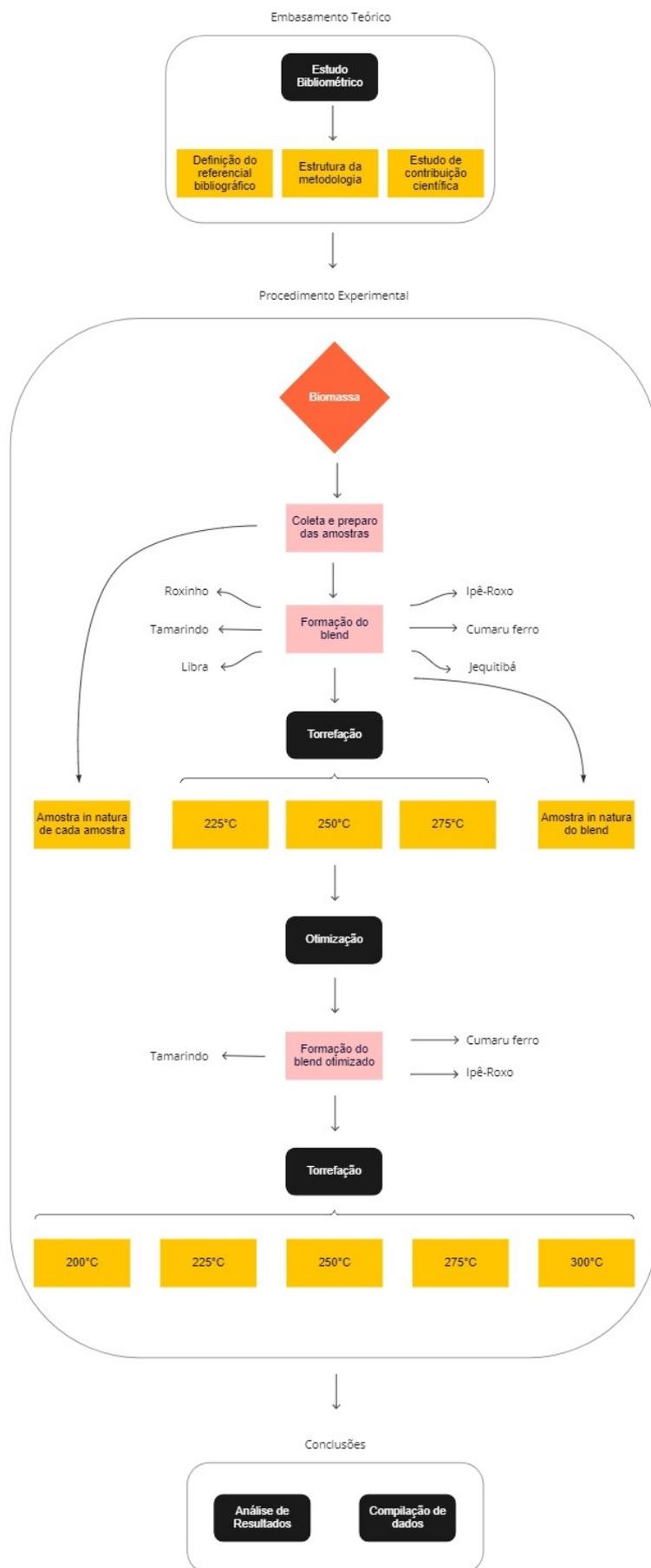


Figura 6 – Fluxograma do trabalho.

3.1 Blend de Biomassa

3.1.1 Preparo das Amostras

As amostras utilizadas neste trabalho são resíduos lenhosos de manejo florestal, uma prática legalizada que respeita o código florestal e instruções normativas dos estados e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Esses resíduos lignocelulósicos foram combinados de maneira a formar um blend de seis espécies de madeiras amazônicas oriundas da Floresta Nacional de Jacundá, localizada na Rondônia, no Brasil. Essas espécies foram escolhidas em função de serem espécies representativas de resíduos de manejo florestal na região amazônica. O blend é formado por partes iguais de cada espécie, como ilustrado na Figura 7. Essas amostras e suas nomenclaturas científicas estão expostas na Tabela 3. Dados específicos de cada espécie *in natura* componente desta pesquisa, como análise elementar e análise imediata (teor de voláteis, de cinzas e de carbono fixo), estão apresentados mais a frente, na seção 4.1.



Figura 7 – Formação do blend lignocelulósico.

Tabela 3 – Espécies de madeira amazônica utilizadas no trabalho.

	Espécie	Nome científico
1.	Roxinho	<i>Peltogyne lecointei</i>
2.	Libra	<i>Erisma uncinatum</i>
3.	Tamarindo	<i>Martiodendron elatum</i>
4.	Ipê-roxo	<i>Handroanthus incanus</i>
5.	Cumarú ferro	<i>Dipteryx odorata</i>
6.	Jequitibá	<i>Allantoma decandra</i>

As amostras foram trituradas em um moinho de martelos e peneiradas a 60 mesh para estabelecer a homogeneidade física do material. Em seguida, essas amostras compuseram um blend que, por sua vez, foi mantido a 104°C durante 15 minutos para secagem

e estabilização do peso, o qual diminui em função da perda de umidade e de voláteis durante esse patamar de temperatura. Depois disso, a mistura foi submetida aos processos térmicos de torrefação e de pirólise para que sua composição química e suas propriedades energéticas fossem avaliadas em termos de eficiência para potencial uso da biomassa como biocombustível.

A caracterização das amostras de madeira e de sua mistura resultante foi obtida por meio de ensaios realizados no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), localizados na Sede do IBAMA, em Brasília/DF.

3.2 Torrefação

3.2.1 Parâmetros

A torrefação à qual o blend foi submetido foi conduzida em atmosfera inerte pois a influência da presença de oxigênio se mostra desvantajosa ao apresentar raios H/C maiores após a degradação da hemicelulose, da celulose e da lignina (CHEN; PENG; BI, 2015); para garantir a presença insignificante de O_2 , foi estabelecido um fluxo constante de gás nitrogênio a uma taxa de 3,5L/min.

O processo de torrefação foi repetido na amostra de biomassa *in natura* para três temperaturas diferentes, 225°, 250° e 275°C, caracterizando, respectivamente, uma torrefação leve, uma suave e uma severa, todas com um tempo de residência de 60 minutos e taxa de aquecimento de 5°C/min.

O produto de biomassa torrefada foi então submetido à pirólise, na qual o fluxo de nitrogênio permaneceu constante. O procedimento se deu no mesmo aparelho analisador e sua faixa de temperatura foi de 25 a 1000°C a uma taxa de aquecimento de 20°C/min. Esse tratamento é feito com o objetivo de analisar como a torrefação impacta a degradação dos componentes lignocelulósicos da biomassa.

3.2.2 Equipamento

Tanto a análise termogravimétrica (TGA) quanto a análise derivativa termogravimétrica (DTG) são feitas ao decorrer dos processos de torrefação e de pirólise das amostras de resíduos de madeira. A amostra submetida aos tratamentos térmicos, de massa 2,8 +/- 0,5 mg, foi posta em um analisador TGA-2000, cujo sistema de reator é apresentado na Figura 8.

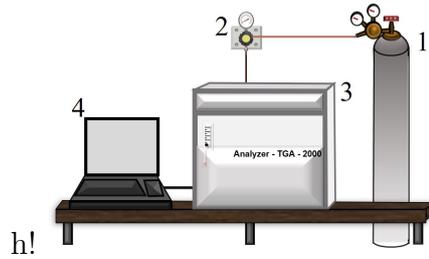


Figura 8 – Sistema do reator com TGA-2000. (1) Cilindro de N₂, (2) Rotômetro de controle de gás, (3) TGA-2000, (4) Computador.

3.2.3 Severidade de Torrefação

A severidade de torrefação indica a sensibilidade de certos parâmetros às mudanças nas condições de torrefação e é identificada não somente pela mudança na temperatura da torrefação, como também por um índice denominado índice de severidade de torrefação (IST). Esse índice é um indicador normalizado, ou seja, ocorre após a secagem das amostras, e indica a degradação térmica da biomassa, que ocorre durante a torrefação (CHEN et al., 2014). A normalização da matéria-prima previamente à análise de severidade de torrefação é vantajosa pois diminui consideravelmente a influência da origem da biomassa na perda de massa (SILVEIRA et al., 2018b; CHEN et al., 2019). O índice de severidade de torrefação é um indicador de performance do processo e seus valores variam de 0 a 1 (CHEN et al., 2014). Este indicador é calculado através da Equação 3.1 (CHEN et al., 2014).

$$IST = \frac{100 - PM^T(t)}{100 - PM^{275}(60)} \quad (3.1)$$

na equação acima, PM representa a perda de massa em condições de torrefação à temperatura T e tempo de residência t . O denominador da equação é composto pela perda de massa na condição de torrefação considerada mais severa em estudo para o blend formado na seção 3.1.1, a 275°C por 60 minutos.

3.2.4 Análises

3.2.4.1 Análise Imediata

A análise imediata é um teste adaptado da indústria do carvão para combustíveis de biomassa em que os voláteis são liberados quando aquecidos em uma atmosfera inerte até 250°C (STREZOV; EVANS, 2015). Esta análise fornece os teores de cinzas, de carbono fixo e de matéria volátil da biomassa torrefada.

Teor de Cinzas

As cinzas resultantes de um processo de torrefação são a parte inorgânica do combustível e seu teor é calculado a partir da diferença de massa antes e depois do

tratamento térmico, como exposto na Equação 3.2 de teor de cinzas (C_z), em que M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho e M_3 é dado pela soma de M_1 e M_2 . A obtenção do teor de cinzas foi conduzido de acordo com a norma ISO 18122:2015.

$$C_z(\%) = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Matéria Volátil

Os materiais voláteis compreendem gases leves, identificados através da diferença de massa da amostra antes e depois do processo de aquecimento. A maior parte da perda de voláteis (aproximadamente 75%) ocorre durante a fase de desvolatilização, que toma lugar logo após a secagem (JENKINS et al., 1998), assim, tem-se que a obtenção do teor de voláteis ocorre em base seca. As amostras foram normalizadas e colocadas numa mufla, em atmosfera inerte, de acordo com a norma ISO 18123:2015. O teor de matéria volátil presente na biomassa torrefada pode ser calculado através da Equação 3.3 de teor de matéria volátil (MV).

$$MV(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_1} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Em que M_1 é a massa da amostra, M_2 é a massa do cadinho e M_3 é dado pela soma de M_1 e M_2 .

Carbono fixo

A taxa de carbono fixo presente na biomassa torrefada indica a quantidade de carbono retido na amostra. Sua relevância reside no fato de que o carbono é a maior fonte de calor liberado durante a combustão de um combustível, ou seja, em um bom combustível, é desejado que o teor de carbono fixo seja alto. A relação entre materiais voláteis e carbono fixo é inversamente proporcional, tendo em vista que grande quantidade de hidrogênio é liberada durante a perda de matéria volátil e, quanto menor a quantidade de hidrogênio retida na biomassa, maior a quantidade de carbono (CHEN; PENG; BI, 2015). O carbono fixo pode ser calculado através da Equação 3.4 de carbono fixo (CF) e sua obtenção foi feita em respeito às diretrizes da norma ISO 18123:2015.

$$CF(\%) = 100 - (C_z + MV) \quad (3.4)$$

Em que C_z é o teor de cinzas e MV é o teor de matéria volátil da amostra.

3.2.4.2 Análise Elementar

Através da análise elementar é possível obter a composição elementar de um combustível, ou seja, níveis de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre contidos na amostra de biomassa estudada. Os ensaios para determinação das propriedades químicas

foram realizados no setor de energia do LPF e seguiram as normas indicadas ao longo do texto.

3.2.4.3 Análise Calorimétrica

Poder Calorífico

O estudo do poder calorífico de uma biomassa se faz necessário em função da importância da obtenção do valor de poder calorífico superior (PCS), retornado através desse estudo. O poder calorífico representa a quantidade de energia que é liberada durante a queima do combustível sólido, sendo assim um parâmetro de grande relevância para validação de potencialidade energética de combustíveis, e pode variar de acordo com as propriedades físicas e químicas da biomassa em tratamento (ALMEIDA; BRITO; PERRE, 2010). O PCS [cal/g] é a quantidade de calorias queimadas durante combustão completa do material e, quanto maior seu valor, maior a energia armazenada no combustível (JUNIOR; R.M, 2010). A análise calorimétrica foi realizada de acordo com a ISO 1928-2009 para calibração do equipamento e a ISO 17225-2014 para cálculo do PCS.

Perda de Massa

A perda de massa também é um parâmetro obtido durante o processo de pré-tratamento térmico e seus valores dependem, além das propriedades do material, da severidade da torrefação. Os valores de perda de massa variam, normalmente, de 50 a 90% (CHEN; PENG; BI, 2015). O cálculo deste parâmetro é dado pela razão mássica entre a biomassa torrefada e a biomassa *in natura*, como demonstrado na Equação 3.5 de perda de massa (PM).

$$PM^T(t) = \frac{m_i(t)}{m_0} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Em que $m_i(t)$ se refere à massa continuamente medida, m_0 se refere à massa *in natura* seca, T é a temperatura de torrefação e t é o tempo de residência.

Rendimento Energético

O rendimento energético é um indicador da quantidade de energia retida na amostra após torrefação (WANNAPEERA; FUNGTAMMASAN; WORASUWANNARAK, 2011) e depende tanto da perda de massa quanto da razão entre os PCS da biomassa torrefada e da biomassa *in natura*, além do tipo de biomassa estudada (KIM et al., 2012). Seu cálculo é feito através da Equação 3.6 de rendimento energético (RE).

$$RE^T(t) = PM \cdot \frac{PCS_i(t)}{PCS_0} \quad (3.6)$$

Em que T é a temperatura de torrefação aplicada, t é o tempo de residência, $PCS_i(t)$ é o poder calorífico registrado pelo equipamento a um tempo t de torrefação e

PCS_0 é o poder calorífico no início da torrefação, ou seja, com $t = 0$.

3.2.4.4 FTIR do Produto Sólido

A análise FTIR, denominada espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier, fornece a identificação dos principais grupos funcionais presentes na biomassa em base seca (depois da desumidificação) que são liberados como voláteis durante tratamento térmico através da absorção de várias frequências de radiação eletromagnética na região do infravermelho do espectro eletromagnético. A radiação nessa região é quantificada em uma unidade denominada comprimento de onda (cm^{-1}) e se torna uma propriedade intrínseca de cada tipo de ligação molecular, tornando possível a identificação de certos grupos funcionais. As análises quantitativa e qualitativa dessas espécies voláteis são fundamentais para a determinação da qualidade do produto sólido torrefado (BIAGINI; TOGNOTTI; BARONTINI, 2006). Os dados do espectro infravermelho foram registrados com 68 varreduras com uma resolução de $4cm^{-1}$ a intervalos de números de onda de $400-4000cm^{-1}$. No presente trabalho, a análise de FTIR foi executada somente para o blend inicial, com o objetivo de caracterizar a biomassa *in natura* e assim estabelecer maiores informações acerca de sua composição molecular.

3.3 Otimização do Blend Lignocelulósico

A otimização do blend de madeira residual foi feita através da análise de cinco fatores considerados relevantes para o bom desempenho do resíduo enquanto matéria-prima energética; foram eles: teor de cinzas, matéria volátil, carbono fixo, poder calorífico e razões atômicas O/C e H/C. Para determinar as espécies "ótimas" que farão parte do blend otimizado, a análise multi-critério trabalha de forma a atingir o máximo de baixo teor de cinzas, baixo teor de matéria volátil, alto carbono fixo, alto poder calorífico e baixas razões atômicas do blend otimizado, de acordo com as relações de dominância e de distância métrica explicitadas nas seções seguintes.

Tabela 4 – Critérios para análise de otimização do Blend.

Espécie	Teor de Cinzas (%, base seca)	Matéria Volátil (%, base seca)	Carbono fixo (%)	Poder Calorífico (MJ/Kg)	O/C	H/C
Roxinho	0,34	80,50	19,16	20,37	0,71	1,88
Libra	0,86	78,94	20,20	20,25	0,77	1,95
Tamarindo	0,21	80,22	19,57	20,93	0,67	1,82
Ipê Roxo	0,18	85,29	14,54	21,05	0,66	1,84
Cumaru Ferro	0,24	83,97	15,79	20,73	0,68	1,83
Jequitibá Rosa	0,81	83,52	15,68	20,05	0,76	1,98

3.3.1 Análise de Dominância

A ponderação de relevância de cada um dos fatores supracitados foi determinada através da análise de dominância. A partir da Tabela 4, foram conduzidas normalizações que visaram o estabelecimento de uma escala uniformizada comum para todos os critérios, a fim de que fossem comparados entre si diretamente. Essas normalizações resultaram em valores dentro de uma escala de 0 a 1 para cada critério associado a cada espécie de madeira estudada. Esses valores foram obtidos da seguinte forma: para critérios dos quais eram almejadas menores quantidades ao final do tratamento térmico, como teor de cinzas, matéria volátil e razão atômica, foi calculada a razão entre o próprio valor e o valor mais alto obtido dentre as espécies; já para critérios dos quais eram almejadas maiores quantidades, a razão foi feita entre o inverso do próprio valor e o inverso do menor valor obtido dentre as espécies - isso se deve ao fato de o programa de análise de distância métrica considerar como "ótimos" somente os menores valores (valores mais próximos da solução numérica desejada) da matriz submetida a ele, tornando necessária a normalização de inversão para casos em que se deseja maior número final.

3.3.2 Análise de Distância Métrica

A análise de distância métrica foi feita por intermédio de um código no software *Matrix Laboratory* (MATLAB), no qual foi submetida a matriz representada pela Tabela 5, que apresenta os valores referência (de menor distância ao valor ótimo) do código em azul.

Tabela 5 – Matriz submetida no MATLAB.

Espécie	Teor de Cinzas (%, base seca)	Matéria Volátil (%, base seca)	Carbono fixo (%)	Poder Calorífico (MJ/Kg)	O/C	H/C
Roxinho	0,395	0,944	0,759	0,984	0,922	0,951
Libra	1,000	0,926	0,720	0,990	1,000	0,985
Tamarindo	0,244	0,941	0,743	0,958	0,880	0,918
Ipê Roxo	0,209	1,000	1,000	0,952	0,867	0,930
Cumarú Ferro	0,279	0,985	0,921	0,967	0,887	0,926
Jequitibá Rosa	0,942	0,979	0,927	1,000	0,995	1,000

3.4 Torrefação do Blend Ótimo

O estudo da torrefação do blend ótimo foi feito em um range abrangente de 200-300°C, passando pelas temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C, fornecendo assim uma análise completa da influência da torrefação nas características da biomassa. O tempo de residência e a taxa de aquecimento dos processos de torrefação foram padronizados a 60 minutos e 7°C/min, respectivamente, e realizados no mesmo equipamento de TGA-2000 mencionado na seção 3.2.2.

4 Resultados

4.1 Caracterização da Biomassa

A caracterização da biomassa *in natura* consiste na análise calorimétrica das amostras de cada espécie e do blend antes da torrefação. Os resultados dessas análises estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Poder calorífico superior das espécies de madeira e do blend *in natura*.

Amostra de Biomassa	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
Roxinho	20,22
Libra	19,66
Tamarindo	20,45
Ipê-roxo	20,62
Cumaru ferro	20,44
Jequitibá	19,76
Blend in natura	20,22

Os valores obtidos para PCS das espécies variam entre 19,66 e 20,62MJ/Kg, em que o maior número foi apresentado pela espécie Ipê-roxo. A diferença entre esses valores se mostra significativa de forma que existe uma discrepância de quase 1 MJ/kg de uma espécie para outra, o equivalente a 0,278 kWh por quilo de resíduo agrupado. A mistura dessas espécies para a composição do blend de madeira irá afetar o valor do poder calorífico da matéria-prima de forma a apresentar um valor intermediário entre os apresentados na Tabela 6, como visto na seção 4.2.2.3.

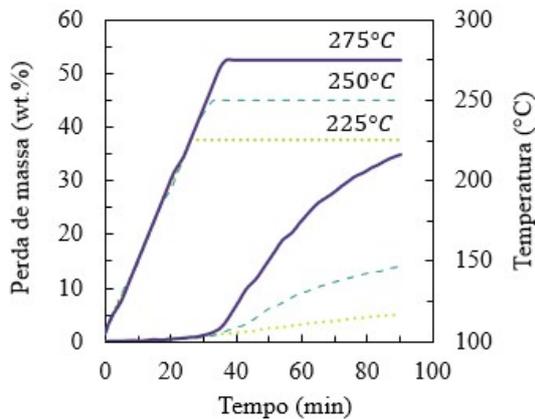
4.2 Torrefação

4.2.1 Performance da torrefação

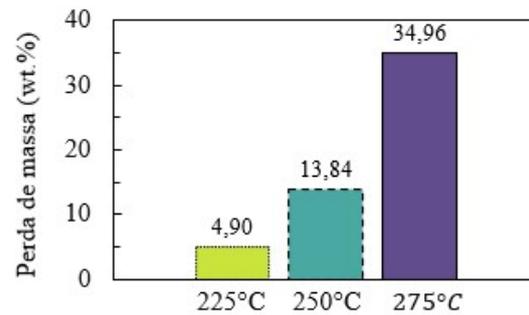
4.2.1.1 Rendimento Gravimétrico

A Figura 9a apresenta as curvas de perda de massa ao longo dos processos de torrefação das amostras normalizadas, que são aquelas que apresentam comportamento polinomial, e as de comportamento térmico da torrefação, que possuem comportamento

linear até atingirem o patamar de temperatura almejada. A Figura 9b mostra os percentuais finais de perda de massa associados a cada temperatura de torrefação.



(a) Curvas de rendimento gravimétrico do blend inicial torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C.



(b) Percentuais finais de perda de massa para blend inicial torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C.

Figura 9 – Curvas e percentuais de perda de massa do blend inicial torrefado.

Os níveis de perda de massa reportados após as torrefações a 225°, 250° e 275°C foram, respectivamente, 4.90%, 13.84% e 34.96% com relação ao blend *in natura*. Analisando as curvas após aproximadamente 30 minutos de tempo de residência, percebe-se que a curva cuja temperatura de torrefação é a mais baixa assume caráter praticamente linear, enquanto as curvas cujas temperaturas são mais altas seguem com um perfil crescente. Esse comportamento é devido ao grau crescente de degradação de ambas celulose e lignina, que são atingidas com intensidade a temperaturas mais altas do que as hemiceluloses (CHEN; PENG; BI, 2015; SILVEIRA et al., 2018a; CHEN; KUO, 2011b).

Conclui-se que a severidade da torrefação tem grande influência sobre a perda de massa, de forma que, quanto maior a temperatura de torrefação, maior o percentual de perda de massa decorrente do processo devido ao fato de que maiores quantidades de voláteis e determinados componentes lignocelulósicos só são decompostos às temperatura atingidos (PROSKURINA et al., 2017).

4.2.1.2 Índice de Severidade de Torrefação

As curvas 3D e 2D do mapeamento do processo de torrefação estão expostas na Figura 10. A partir delas, é possível identificar duas curvas dependentes da temperatura (Curvatura = 0 e curvatura intermediária) e duas curvas dependentes do tempo de residência de torrefação (alta e baixa curvatura). Os perfis ilustrados são avaliados de tal forma que, quanto mais alta a curvatura, mais sensível a perda de massa à temperatura de torrefação (CHEN; PENG; BI, 2015), sendo assim, o blend se mostrou altamente dependente da temperatura de operação do tratamento térmico, apresentando maior instabilidade térmica e maior perda de massa associada a temperaturas mais altas de torrefação. Os

valores de IST variam de 0 a 0,24 para 225-235°C, de 0,24 a 0,39 para 235-250°C e de 0,39 a 1,00 para 250-275°C.

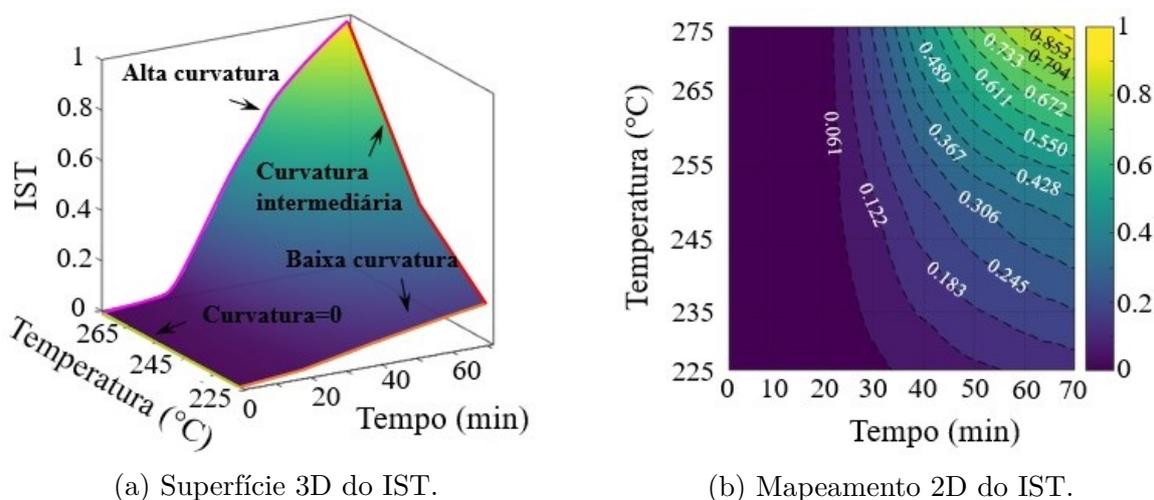


Figura 10 – Curvas de índice de severidade da torrefação do blend inicial.

4.2.2 Análise do produto torrefado

4.2.2.1 Análise Imediata

Os resultados da análise imediata do blend estão expostos na Figura 11. A partir da análise desses resultados após o pré-tratamento, é possível perceber que o percentual de voláteis presentes no produto sólido em base seca diminui à medida que aumenta a intensidade da torrefação, característica favorável à aplicação da biomassa para fins energéticos, posto que a umidade e os voláteis leves contêm demasiada quantidade de oxigênio (O) e hidrogênio (H) em sua composição e sua eliminação implica maior retenção de carbono (C), acarretando aumento de densidade energética/poder calorífico da biomassa para queima de combustível.

Em contrapartida, os teores de cinzas e de carbono fixo na biomassa torrefada são diretamente proporcionais à temperatura de torrefação, apresentando aumento ao passo que a torrefação se intensifica. O incremento de carbono fixo é um dos objetivos finais principais do tratamento da biomassa pura por influenciar diretamente no aumento do poder calorífico da matéria e se dá pela liberação de oxigênio e hidrogênio. As cinzas são indesejáveis, mas esperadas após o processo de combustão.

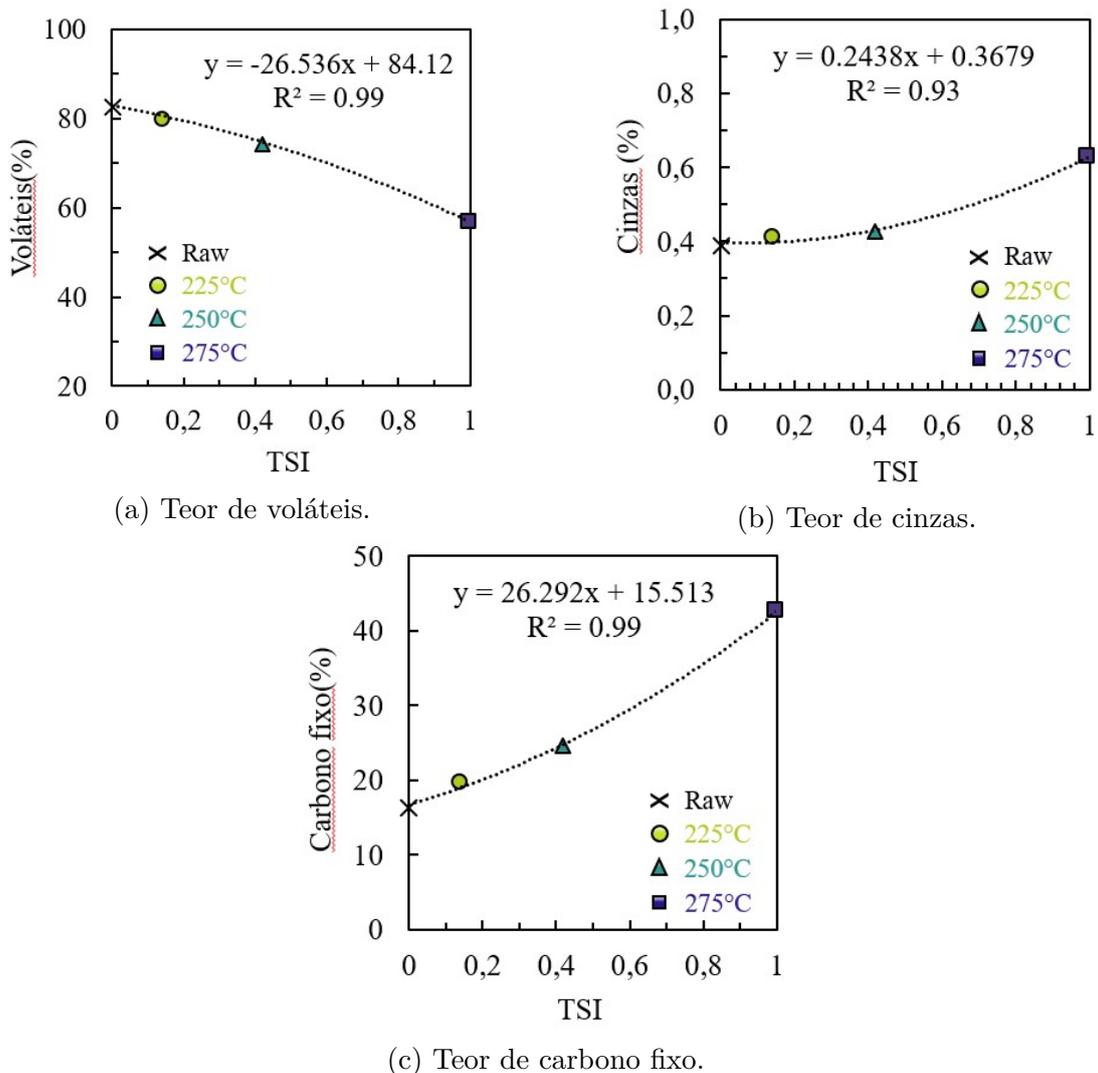


Figura 11 – Componentes da análise imediata do blend inicial.

4.2.2.2 Análise Elementar

Os resultados da análise elementar do produto torrefado se encontram nas Tabelas 7 e 8, nas quais constam os níveis de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), oxigênio (O) e enxofre (S) de cada espécie *in natura*, do blend *in natura* e do blend torrefado, além das razões atômicas, que visam fornecer a razão entre os elementos mais significantes para a análise de eficiência energética do combustível.

Tabela 7 – Elementos e razões atômicas para espécies *in natura*.

Amostra de Biomassa	Elementos Químicos					Razões Atômicas	
	C	H	O	N	S	O/C	H/C
Roxinho	47,60	7,46	44,72	0,21	0,09	0,71	1,88
Libra	45,70	7,43	46,56	0,31	0,13	0,77	1,95
Tamarindo	48,67	7,37	43,65	0,30	0,10	0,67	1,82
Ipê-roxo	48,94	7,51	43,22	0,33	0,08	0,66	1,84
Cumarú ferro	48,51	7,41	43,85	0,23	0,08	0,68	1,83
Jequitibá	45,78	7,55	46,40	0,27	0,09	0,76	1,98

Tabela 8 – Elementos e razões atômicas para blend *in natura* e torrefado.

Amostra de Biomassa	Elementos Químicos					Razões Atômicas	
	C	H	O	N	S	O/C	H/C
Blend <i>in natura</i>	47,68	7,44	44,57	0,32	0,08	0,70	1,87
Blend torrefado a 225°C	49,77	6,94	43,00	0,30	0,09	0,65	1,67
Blend torrefado a 250°C	51,50	6,48	41,81	0,21	0,09	0,61	1,51
Blend torrefado a 275°C	58,24	5,11	36,34	0,30	0,10	0,47	1,05

Diante do exposto, é possível averiguar que os níveis do blend *in natura* são condizentes com o percentual presente em cada uma de suas partes, como visto na seção 4.1. Além disso, é comprovado que a torrefação aumenta a quantidade de carbono e diminui aquelas de hidrogênio e oxigênio gradativamente à medida que a intensidade do procedimento aumenta, como previsto por (CHEN; PENG; BI, 2015).

As razões atômicas das amostras são comumente representadas a partir de diagramas denominados Diagrama de van Krevelen (STREZOV; EVANS, 2015). Para as amostras ensaiadas, esse diagrama está apresentado na Figura 12, na qual é possível verificar as razões de H/C e O/C tanto para o blend quanto para as espécies *in natura* e para os blends torrefados, de acordo com a legenda presente no gráfico. Os indicadores do blend torrefado com menores valores de razões atômicas são referentes às maiores temperaturas de torrefação. Desse gráfico, são extraídos resultados acerca da mudança na composição da biomassa compatíveis com aqueles premeditados por estudos já conduzidos (ROUSSET et al., 2012; MEI et al., 2014), em que os níveis de H/C e O/C diminuem após torrefação devido à remoção de umidade e voláteis.

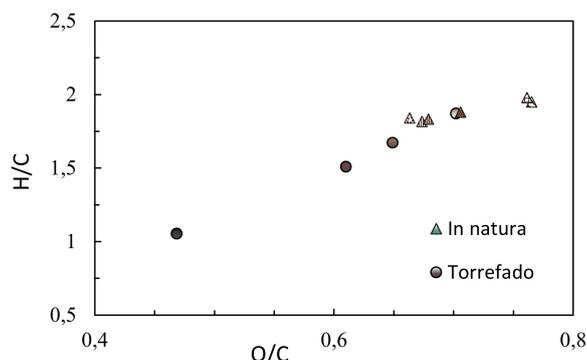


Figura 12 – Diagrama de van Krevelen para blend inicial *in natura* e torrefado.

4.2.2.3 Análise Calorimétrica

A determinação do poder calorífico da biomassa é feita através da análise imediata e possui destaque dentre os resultados do processo de torrefação por ser um parâmetro considerado qualificador de qualidade e de eficiência de um combustível sujeito à queima.

A Tabela 9 mostra os resultados da análise calorífica do blend *in natura*, a critério de comparação, e do blend torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C. A partir

dela, é possível averiguar que o maior valor de poder calorífico superior (PCS) foi atingido pelo blend tratado termicamente através de torrefação severa, podendo assim associar maiores temperaturas de operação a maiores quantidades de energia a ser liberada durante queima do combustível.

Tabela 9 – PCS das espécies de madeira *in natura* e do blend *in natura* e torrefado.

Amostra de Biomassa	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
Blend <i>in natura</i>	20,22
Blend Torrefado 225°C	20,48
Blend Torrefado 250°C	20,66
Blend Torrefado 275°C	21,64

Ao comparar o blend *in natura* com os blends torrefados, realiza-se o cálculo de fator de incremento do poder calorífico, ao qual são atribuídos os valores presentes na Tabela 10. A partir disso, constata-se um aumento de 1,3% para o blend torrefado a 225°C, um aumento de 2,2% para o blend torrefado a 250°C e, por fim, um aumento de 7% para o blend torrefado a 275°C em relação ao PCS do blend *in natura*.

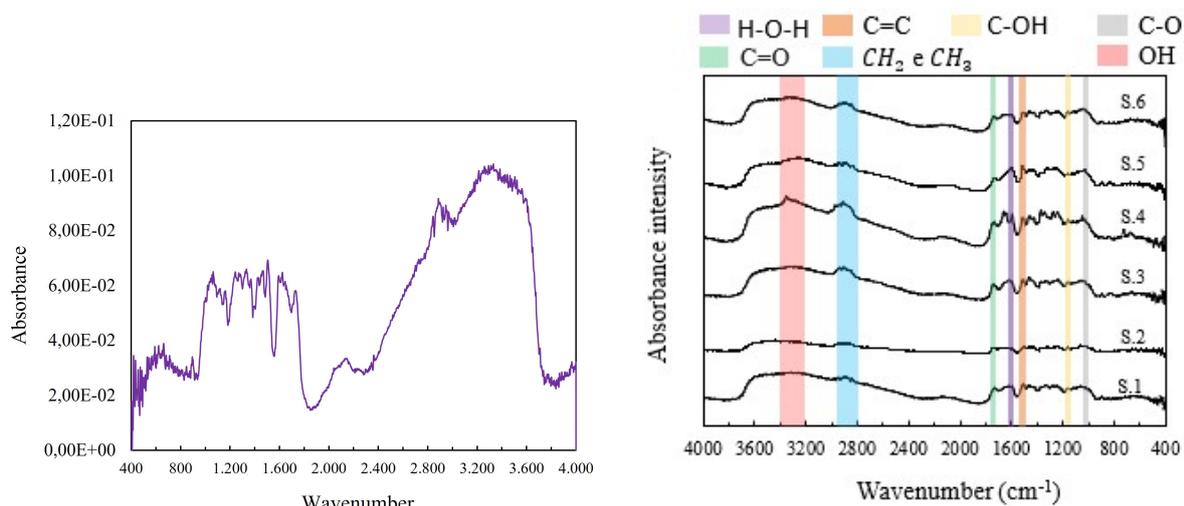
Tabela 10 – Incremento de poder calorífico dos blends torrefados.

Temperatura de Torrefação do Blend (°C)	Fator de Incremento
225	1,01
250	1,02
275	1,07

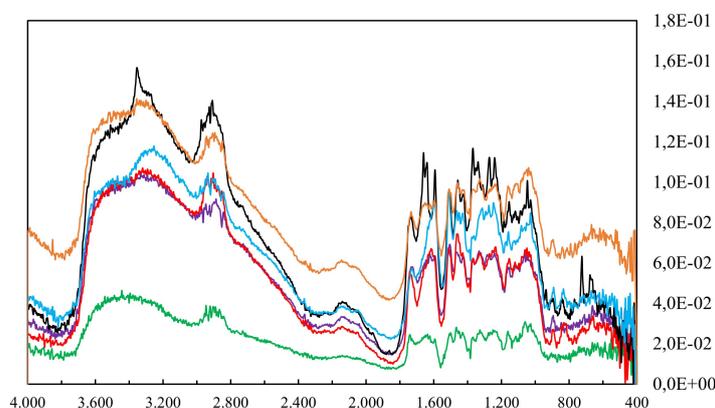
4.2.2.4 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

A análise dos ensaios de FTIR resultou nos perfis identificados pela Figura 13. A acentuação dos picos na Figura 13b define o quão intensas são as taxas de absorção de cada grupo em cada espécie de madeira utilizada no estudo. A partir disso, é possível averiguar que as espécies 4 e 5 foram as que apresentaram, em um panorama geral, bandas mais largas e de maior intensidade de absorção dos grupos identificados.

A partir desses resultados, é possível identificar a presença de alguns grupos funcionais principais, tais quais: H-O-H, C=C, C-OH, C-O, C=O, OH, CH_2 e CH_3 . Apesar de haver grande perda do grupo OH, essas perdas não se restringem à água tendo em vista que os ensaios são executados já em base seca ((ZHANG; KAMDEM, 2005)). As faixas de radiação (números de onda) nas quais são encontradas essas ligações são visíveis nos espectros infravermelhos através da identificação dos picos principais dos perfis e são dadas por: 1600 para H-O-H, 1680-1700 para C=C, 1170-1195 para C-OH, 1000-1020 para C-O, 1770-1780 para C=O, 3200-3400 para OH e 2800-2990 para CH_2 e CH_3 . Nas Figuras 13a e 13c, temos as o espectro infravermelho do blend e de cada espécie, respectivamente.



(a) Espectro infravermelho do blend inicial. (b) Grupos funcionais principais e suas respectivas faixas de detecção de infravermelho para cada espécie *in natura* que compõe o blend inicial.



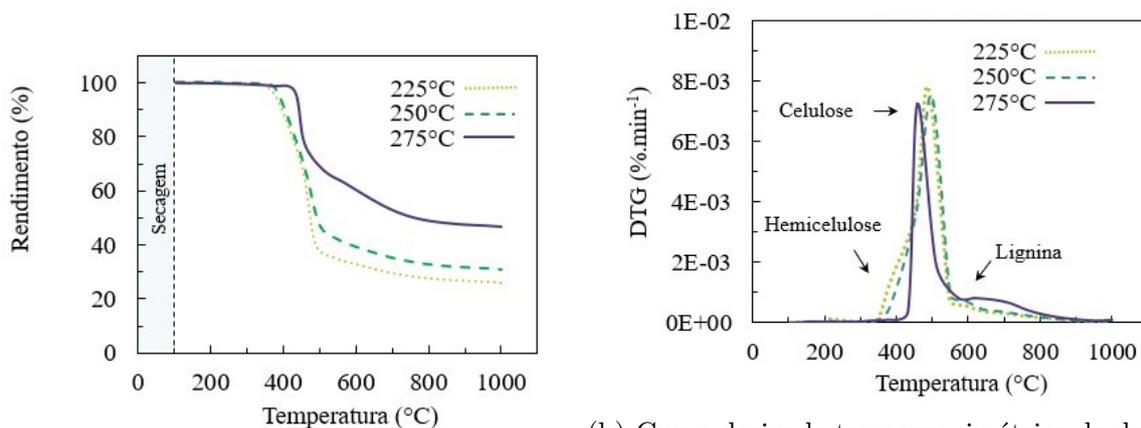
(c) Espectros infravermelhos de cada espécie *in natura* que compõe o blend inicial.

Figura 13 – Espectros infravermelhos.

4.3 Pirólise do produto torrefado

A pirólise, quando executada após a torrefação, tem o papel de indicador qualitativo da torrefação, e trabalha avaliando seu comportamento. Ela indentifica picos, também chamado de "ombros", de degradação dos componentes da biomassa (hemicelulose, celulose e lignina), evidenciando seu comportamento ao longo do procedimento e a intensidade com a qual são decompostos. A Figura 14 exhibe os resultados da pirólise.

A partir do gráfico de rendimento sólido é possível perceber que, para os processos de pirólise efetuados, as temperaturas iniciais de degradação foram 330.15°C, 362.6°C e 408.6°C para as temperaturas de torrefação 225°C, 250°C e 275°C, respectivamente, comprovando que quanto maior a temperatura de torrefação, maior a estabilidade térmica do produto sólido, como previsto por (SINGH; SARKAR; CHAKRABORTY, 2020). Além disso, ainda no gráfico de rendimento sólido, são retornados os valores de rendimento sólido após o processo de pirólise: 25.8% para 225°C seguido de 30.9% e 46.6% para 250°C e



(a) Rendimento sólido da pirólise do blend inicial torrefado a 225°C, 250°C e 275°C.

(b) Curva derivada termogravimétrica da degradação dos componentes principais da biomassa torrefada a 225°C, 250°C e 275°C durante a pirólise.

Figura 14 – Resultados da pirólise do blend inicial torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C.

275°C, respectivamente.

O gráfico de análise termogravimétrica derivativa (DTG) mostra a decomposição de hemicelulose, celulose e lignina da madeira torrefada e pirolisada em função das temperaturas de pirólise. Ao todo, são três ombros de decomposição de componentes lignocelulósicos: os primeiros ocorrem entre 320-430°C e caracterizam a degradação de hemiceluloses, seguidos dos maiores picos a 440-550°C que representam, por sua vez, a taxa de degradação da celulose. Por último, os menores ombros são característicos da lignina e ocorrem entre 580-700°C.

É observado também que as intensidades dos ombros são reduzidas ao passo que a severidade da torrefação aumenta e que os componentes atingem alta degradação, em concordância com estudos já publicados acerca do assunto (LIN et al., 2018). Por fim, conclui-se que há maior decomposição de hemicelulose para temperaturas de tratamento mais altas e, com isso, maiores taxas de celulose e lignina são retidas nas torrefações de temperaturas 250°C e 275°C. Isso afere maior densidade energética à biomassa (TUMULURU, 2011), aprimorando suas propriedades para uso energético.

4.4 Otimização do Blend Lignocelulósico

Os valores de dominância forte e fraca retornados pelo programa estão expostos na Tabela 11 e seu percentual indica quão relevante é sua dominância frente às outras espécies em estudo. O total indica a acurácia dos resultados de cada espécie com relação ao resultado ótimo almejado, ou seja, o "nível de ótimo" que aquela espécie apresenta.

A partir disso, é possível averiguar que a espécie *Martiodendron elatum* (Tamarindo) é a melhor espécie (em 43%) para compor o blend otimizado, seguida por *Peltogyne*

Tabela 11 – Resultados de dominância métrica.

Espécie	Dominância Fraca (%)	Dominância Forte (%)	dn	Total (%)
Roxinho	67	17	0,76	53
Libra	83	0	0,00	28
Tamarindo	83	50	0,96	76
Ipê Roxo	83	0	0,65	49
Cumarú Ferro	67	0	0,75	47
Jequitibá Rosa	50	0	0,07	19

lecointei (Roxinho), *Handroanthus incanus* (Ipê Roxo) e *Dipteryx odorata* (Cumarú ferro) em partes praticamente iguais. Assim, foi decidido que o blend ótimo seria composto por uma parcela maior da espécie Tamarindo, parcela essa proporcional a quão melhor ela é em relação às outras espécies mencionadas. Dessa forma, as novas proporções do blend ótimo estão de acordo com a Figura 15.

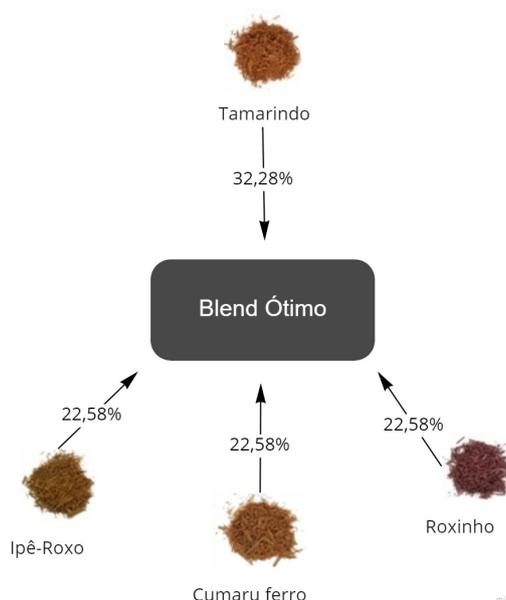


Figura 15 – Formação do blend lignocelulósico otimizado.

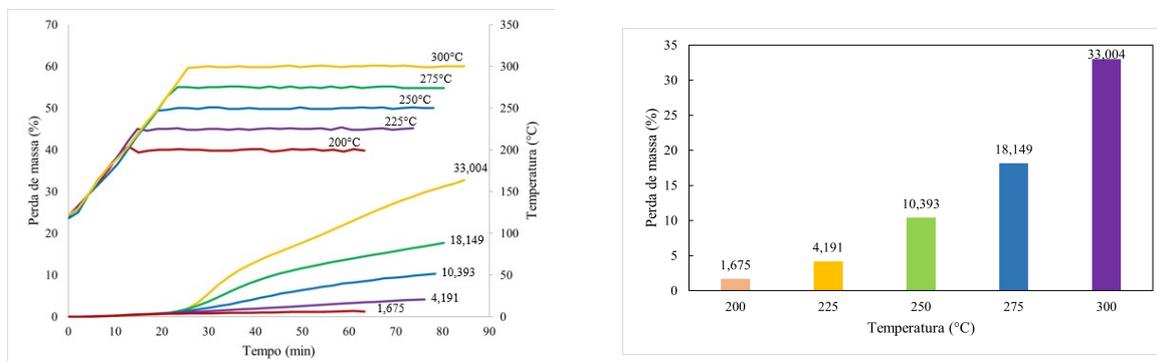
4.5 Torrefação do Blend Ótimo

4.5.1 Performance da torrefação

4.5.1.1 Rendimento Gravimétrico

A Figura 16a apresenta as curvas de perda de massa (curvas de caráter polinomial na parte inferior do gráfico) e seus respectivos comportamentos de torrefação (curvas lineares até obtenção de patamar na parte superior do gráfico) ao longo dos processos de tratamento térmico do blend ótimo. Essas curvas possuem tempos diferentes de torrefação

pois é levado em conta o tempo de aquecimento do equipamento até temperatura desejada, de forma que, a uma taxa de aquecimento constante, espera-se tempos maiores para maiores temperaturas de torrefação. Oscilações nos patamares de temperatura se devem ao processo de manutenção da temperatura exercido pela própria máquina durante o procedimento. Na Figura 16b são expostos os valores finais de perda de massa.



(a) Curvas de rendimento gravimétrico do blend otimizado torrefado às temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C. (b) Percentuais finais de perda de massa para blend otimizado torrefado às temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C.

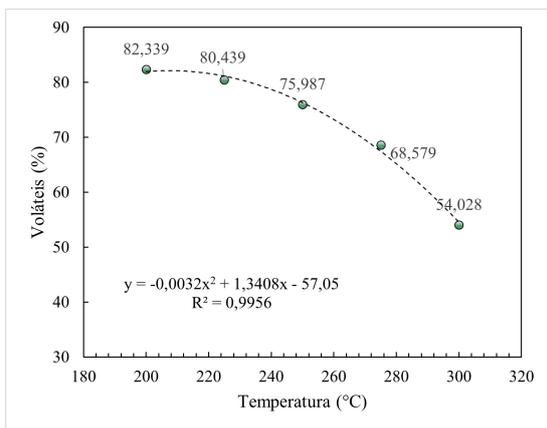
Figura 16 – Curvas e percentuais de perda de massa do blend otimizado torrefado.

Os níveis de perda de massa reportados após as torrefações a 200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C foram, respectivamente, 1.675%, 4.191%, 10.393%, 18.149% e 33.004% com relação ao blend *in natura*. O comportamento das torrefações é então condizente com aquelas executadas para o blend inicial, comprovando maior perda de massa a temperaturas mais altas em função da maior quantidade de energia necessária para início da degradação de celuloses e lignina, além de maior perda de voláteis.

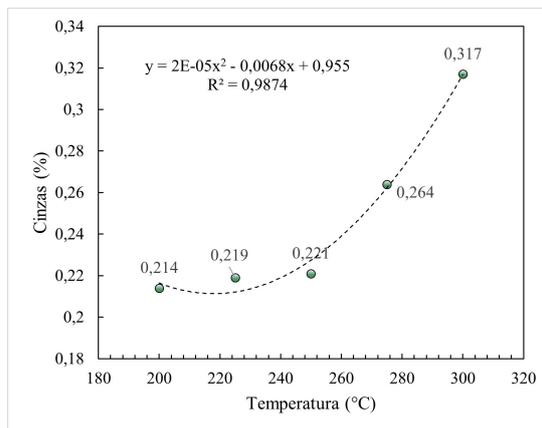
4.5.2 Análise do produto torrefado

4.5.2.1 Análise Imediata

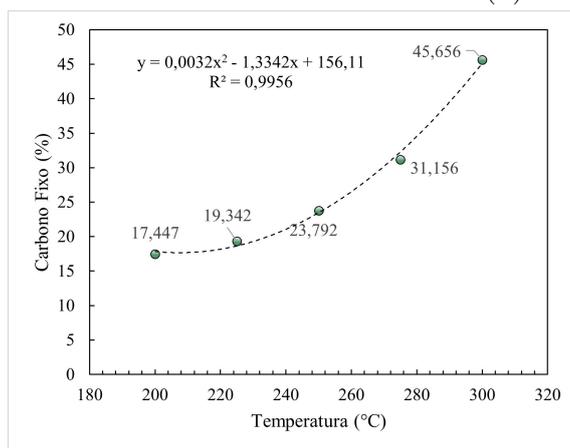
Os resultados da análise imediata do blend otimizado estão expostos na Figura 17. A partir da análise desses resultados, infere-se um comportamento semelhante (ou seja, com tendências equivalentes) ao já posto neste trabalho na seção 4.2.2.1, em que foi feita a análise imediata do blend inicial. Ao fazer uma comparação direta com aqueles resultados, averigua-se que houve menor perda de voláteis em base seca em função dos critérios de otimização do blend, menor formação de cinzas e maior carbono fixo. Todos esses resultados demonstram, em geral, o aprimoramento das características da biomassa, o que favorece o aumento de sua densidade energética, tornando-a ainda mais adequada para queima de combustível.



(a) Teor de voláteis.



(b) Teor de cinzas.



(c) Teor de carbono fixo.

Figura 17 – Componentes da análise imediata do blend otimizado.

4.5.2.2 Análise Calorimétrica

A Tabela 9 mostra os resultados da análise calorífica do blend otimizado às temperaturas de 200°C, 225°C, 250°C, 275°C e 300°C os compara àqueles valores de PCS do blend inicial torrefado às temperaturas de 225°C, 250°C e 275°C já expostos na seção 4.2.2.3. A partir dela, é possível averiguar que o maior valor de poder calorífico superior (PCS) foi atingido pelo blend ótimo tratado termicamente através de torrefação mais intensa, comprovando que maiores temperaturas de operação estão, necessariamente, relacionadas a maiores quantidades de energia a ser liberada durante queima do combustível.

Tabela 12 – Comparação de PCS do blend e do blend otimizado torrefados.

Temperatura de Torrefação (°C)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	
	Blend	Blend Otimizado
200		20,88
225	20,48	20,89
250	20,66	21,32
275	21,64	22,03
300		24,03

Tabela 13 – Incremento do poder calorífico dos blends otimizados após torrefação.

Amostra de Biomassa	Temperatura de Torrefação (°C)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Fator de incremento do poder calorífico
Blend <i>in natura</i>	#	20,22	#
	200	20,88	1,03
	225	20,89	1,03
Blend Ótimo	250	21,32	1,05
	275	22,03	1,08
	300	24,03	1,18

Ao comparar os valores de poder calorífico do blend *in natura* com os valores do blend ótimo torrefado, realiza-se o cálculo do fator de incremento do poder calorífico, ao qual são atribuídos os valores presentes na Tabela 13. A partir disso, constata-se que, em relação ao blend *in natura*, houve um aumento de 3,2% para o blend torrefado a 200°C, um aumento de 3,3% para o blend torrefado a 225°C, um aumento de 5,4% para o blend torrefado a 250°C, um aumento de 8,9% para o blend torrefado a 275°C e, por fim, um aumento de 18,8% para o blend torrefado a 300°C.

5 Conclusão

A partir de estudos de técnicas de otimização e dos métodos apresentados neste documento, foi possível a concepção de um blend ótimo que foi, por sua vez, torrefado e analisado com a finalidade de comparação ao blend torrefado que não passou pelo processo de otimização, sendo possível concluir que os objetivos específicos foram atingidos posto que o processo de torrefação é contribuinte para a melhoria das propriedades físico-químicas da biomassa lignocelulósica e que a otimização do blend de madeira através da análise multi-critério foi bem sucedida. Ambos processos de tratamento e caracterização trabalharam em conjunto para o desenvolvimento de uma matéria prima renovável de características aptas à queima de combustível consideradas melhores, a mesmas severidades de torrefação, do que aquelas da biomassa em questão a priori dos tratamentos.

Em se tratando da composição elementar da biomassa, averigua-se a diminuição dos níveis de oxigênio (O) e de hidrogênio (H) através da degradação de produtos voláteis e de umidade ao final da torrefação, o que proporcionou à amostra de biomassa maior densidade de carbono (C), aprimorando assim seu potencial energético. As diferentes temperaturas adotadas para torrefação demonstraram significativo impacto na composição da madeira, de maneira que o processo conduzido a temperaturas mais altas (275°C no caso do blend inicial e 300°C para o blend otimizado) apresentou maior degradação de hemicelulose, maior retenção de lignina e maior carbono fixo. Com isso, é possível constatar que a biomassa de origem lenhosa exibe características favoráveis promissoras para sua aplicação como fonte energética não só como combustível, como também em iniciativas industriais.

Os resultados obtidos neste trabalho expuseram a relevância de cada processo de tratamento da biomassa em questão (madeira amazônica de diferentes espécies), comprovando a possibilidade de aprimoramento de resíduos lignocelulósicos de manejo florestal de forma a obter propriedades mais satisfatórias e de caráter mais competitivo face às matrizes energéticas de combustível fóssil, atingindo assim o objetivo principal do trabalho.

Como proposta de perspectivas futuras para a continuação deste trabalho, é apresentada a possibilidade de execução de ensaios de FTIR para o blend inicial torrefado e para o blend otimizado *in natura* e torrefado, para que sejam identificados com maior especificidade os grupos funcionais degradados durante a torrefação, comprovando que

não somente água é perdida durante o processo de pré-tratamento.

Referências

- AFONSO, M. H. F. et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? aplicação do processo proknow-c na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. *Revista de Gestão Social e Ambiental v.5, n.2*, p. 47–62, 2011. Citado na página 4.
- AGENCY, I. E. *World Energy Outlook*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 1.
- ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRE, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology 101*, p. 9778–9784, 2010. Citado na página 22.
- ARAUJO, R. O. et al. Renewable energy from biomass: an overview of the amazon region. 2021. Citado na página 1.
- ARIAS, B. et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 13.
- BARROS-JUNIOR, U. O. et al. Effects of tree spacing and forking on the modification of wood density in a trial plantation of *Tachigali Vulgaris* for energy in amazonia. *Journal of Tropical Forest Science 34*, p. 11–23, 2022. Citado na página 9.
- BERGMAN, P. C. A.; KIEL, J. H. A. Torrefaction for biomass upgrading. *European Biomass Conference e Exhibition*, p. 17—21, 2005. Citado na página 13.
- BIAGINI, E.; TOGNOTTI, L.; BARONTINI, F. Devolatilization of biomass fuels and biomass components studied by tg/ftir technique. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2006. Citado na página 23.
- BRIDGWATER, A.; MEIER, D.; RADLEINC, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry 30*, p. 1479–1493, 1999. Citado na página 12.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. *IPEF, Piracicaba, n. 52*, p. 1–7, 1979. Citado na página 10.
- CHEN, W. et al. Torrefaction performance prediction approached by torrefaction severity factor. *Fuel. 251*, p. 126—135, 2019. Citado na página 20.
- CHEN, W. et al. Thermal decomposition dynamics and severity of microalgae residues in torrefaction. *Bioresource Technology 169*, p. 258—264, 2014. Citado na página 20.
- CHEN, W.; KUO, P. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. 2010. Citado na página 1.
- CHEN, W.; KUO, P. C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy 36*, p. 803–811, 2011. Citado na página 13.

- CHEN, W.-H.; KUO, P.-C. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. 2011. Citado na página 26.
- CHEN, W.-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. 2015. Citado 11 vezes nas páginas 1, 8, 9, 10, 11, 13, 19, 21, 22, 26 e 29.
- COSTA, V. E. *Caracterização Físico-Energética da Madeira e Produtividade de Reflorestamentos de Clones de Híbridos de Eucalyptus grandis x E. Urophylla*. 79 p. Dissertação (Doutorado em Agronomia) — Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006. Citado na página 9.
- DEB, K. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. [S.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 2001. Citado na página 15.
- DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. A. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy, Exploration e Exploitation* 20, p. 105—111, 2004. Citado na página 11.
- DENG, J. et al. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 86, p. 331–337, 2009. Citado na página 13.
- EPE. *Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050*. Rio de Janeiro: MME/EPE: EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2021. Citado na página 2.
- EVARISTO, R. B. et al. Multiparameter-analysis of CO_2 /steam-enhanced gasification and pyrolysis for syngas and biochar production from low-cost feedstock. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 14.
- FELIX, C. R. de O. et al. Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador al-mcm-41. *Revista Matéria*, 2017. Citado na página 12.
- FERREIRA, A. F.; RIBAU, J. P.; COSTA, M. A decision support method for biochars characterization from carbonization of grape pomace. 2020. Citado na página 14.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, p. 67–74, 1971. Citado na página 9.
- FOX, J. J. *Harvest of the palm*. Cambridge: Harvard University Press, 1977. 290 p. Citado na página 2.
- GOMES, M. S. *Produção de bio-óleo através do processo termoquímico de pirólise*. 53 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)) — Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010. Citado na página 7.
- GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. *Belo Horizonte: CETEC*, p. 27—41, 1980. Citado na página 8.
- GOMIDE, J. et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de eucalyptus do brasil. *Revista Árvore* 29, p. 129–137, 2005. Citado na página 10.

GUEDES, C. L. B. et al. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. *Química Nova* 33, p. 781–786, 2010. Citado na página 12.

HOMMA, A. K. O. Floresta, urgente. *Agroanalysis n°2*, p. 32–33, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

HOMMA, A. K. O. Amazônia: manejo ou reflorestamento? *Opiniões n°2*, p. 44, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

IBGE. *Contas econômicas ambientais de energia: produtos da biomassa : Brasil : 2015-2018 / IBGE, Coordenação de Contas Nacionais e Empresa de Pesquisa Energética*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Citado na página 7.

JENKINS, B. M. et al. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54, p. 17–46, 1998. Citado na página 21.

JUNIOR, C.; R.M. Desenvolvimento e análise energética do processo de obtenção do biodiesel de microalga por metanólise *in situ*. 2010. Citado na página 22.

KENNEY, W. A.; SENNERBY-FORSSE, L.; LAYTON, P. A review of biomass quality research relevant to the use of poplar and willow for energy conversion. *Biomass* 21, p. 163–188, 1990. Citado na página 8.

KIM, Y.-H. et al. Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*liriodendron tulipifera*). *Bioresource Technology* 116, p. 120–125, 2012. Citado na página 22.

KORKMAZ, A. et al. Pyrolysis of the tetra pak. *Waste Management* 29, p. 2836—2841, 2009. Citado na página 12.

LAMERS, P. et al. Developing the global bio-economy, technical, market, and environmental lessons from bioenergy. *Elsevier Inc*, 2016. Citado na página 13.

LAMERS, P. et al. *Developing the Global Bioeconomy. Technical, Market, and Environmental Lessons from Bioenergy*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2016. Citado na página 2.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A. Combustion quality of biomass: Practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Mischanthus x giganteus*. *European Journal of Agronomy* 6, p. 163—177, 1997. Citado na página 8.

LIMA, M. D. R. *A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira*. 205 p. Dissertação (Programa de pós-graduação em Ciências Florestais) — UFRA, Belém, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.

LIN, B. et al. Thermal degradation and compositional changes of wood treated in a semi-industrial scale reactor in vacuum. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 130, p. 249–255, 2018. Citado na página 32.

LIPINSKY J. R. ARCATE, T. B. R. E. S. Torrefied wood, an enhanced wood fuel. *Fuel Chemistry Division Preprints* 47, p. 408—410, 2002. Citado na página 9.

LU, Q. et al. Influence of pyrolysis temperature and time on the cellulose fast pyrolysis products: Analytical py-gc/ms study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 92, p. 430—438, 2011. Citado na página 7.

- MAGGI, R.; DELMON, B. Comparison between ‘slow’ and ‘flash’ pyrolysis oils from biomass. *Fuel* 73, p. 671–677, 1994. Citado na página 12.
- MARTINS, H. *Madeira como fonte de energia*. 9–26 p. Dissertação (Mestrado) — PENEDO, W. R. (Ed.), Belo Horizonte: CETEC, 1980. Citado na página 10.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83, p. 37—46, 2002. Citado na página 11.
- MEI, Y. et al. Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas. 2014. Citado na página 29.
- MEIER, D.; FAIX, O. State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials — a review. *Bioresource Technology* 68, p. 71—77, 1999. Citado na página 12.
- MORESCHI, J. C. *Propriedades da Madeira*. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2005. Citado na página 9.
- NATIONS, U. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework convention on Climate Change*. [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 2.
- NEVES, T. A. *Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais*. 94 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira) — UFLA, Lavras, 2012. Citado na página 11.
- NHUCHHEN, D.; BASU, P.; ACHARYA, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy Biofuels*, p. 1–56, 2014. Citado na página 7.
- NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and co2 of brazilian amazon timber: two case studies of forest harvesting. *Resources, Conservation Recycling* 122, p. 280–285, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.
- OLIVEIRA, J. B. de; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Carbonização da madeira, modelo físico e influência das variáveis de processo. *Boletim da Associação Brasileira de Metais, São Paulo, v. 40, n. 319*, p. 315–319, 1984. Citado na página 10.
- PANNIRSELVAM, P. V. Desenvolvimento de projeto para produção de fibra de coco com inovação de tecnologia limpa e geração de energia. *Revista Analytica* 15, p. 56–61, 2005. Citado na página 12.
- PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. *Textbook of technology*. 3. ed. [S.l.]: New York, McGraw Hill, 1980. 722 p. Citado na página 9.
- PARADELA, F. M. R. *Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa*. 322 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química e Bioquímica) — Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012. Citado na página 12.
- PEDROSA, M. M. *Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo*. 114 p. Dissertação (Doutorado em Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Citado na página 11.
- PEREIRA, J. C. D. et al. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no brasil. *EMBRAPA Florestas. Documentos*, 38, p. 113, 2000. Citado na página 9.

- POSEY, D. A. Indigenous knowledge and development: an ideological bridge to the future. *Ciência e Cultura* n°35, p. 877–894, 1983. Citado na página 2.
- PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: Part 1. weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77, p. 28–34, 2006. Citado na página 13.
- PROSKURINA, S. et al. Biomass for industrial applications: The role of torrefaction. 2017. Citado 4 vezes nas páginas 1, 2, 13 e 26.
- RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. da C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp.* *Cerne, Lavras, v.12*, p. 93–106, 2006. Citado na página 10.
- REZENDE, M. A. de; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. *IPEF n.39*, p. 33–40, 1988. Citado na página 9.
- ROUSSET, P. et al. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresource Technology* 102, p. 8225–8231, 2011. Citado na página 13.
- ROUSSET, P. et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. *Fuel Processing Technology* 92, p. 1890–1897, 2011. Citado na página 8.
- ROUSSET, P. et al. Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012. Citado na página 29.
- ROWELL, R. M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. [S.l.]: CRC Press, 2004. 458 p. Citado na página 10.
- SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, p. 2262–2289, 2011. Citado na página 7.
- SHALINI, S. S. et al. Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020. Citado na página 7.
- SILVA, F. T. M. *VALORIZAÇÃO DA MADEIRA Eucalyptus sp. VIA PIRÓLISE: CARACTERIZAÇÃO E RENDIMENTOS DOS PRODUTOS*. 152 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 8, 10 e 12.
- SILVEIRA, E. A. et al. Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of *Eucalyptus grandis* macro-particulates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 26.
- SILVEIRA, E. A. et al. Heat treatment kinetics using three-stage approach for sustainable wood material production. *Ind. Crops Prod.* 124, p. 563–571, 2018. Citado na página 20.
- SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. do. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. *Acta Amazonica* 43, p. 179–184, 2013. Citado na página 9.

SINGH, R.; SARKAR, A.; CHAKRABORTY, J. Effect of torrefaction on the physicochemical properties of eucalyptus derived biofuels: estimation of kinetic parameters and optimizing torrefaction using response surface methodology (rsm). 2020. Citado na página 31.

SJOSTROM, E. *Wood chemistry: fundamentals and applications*. 2. ed. [S.l.]: New York: Academic Press, 1993. 293 p. Citado na página 10.

SOPONPONGPIPAT, N.; SAE-UENG, U. The effect of biomass bulk arrangements on the decomposition pathways in the torrefaction process, renew. *Energy* 81, p. 679–684, 2015. Citado na página 13.

STREZOV, V.; EVANS, T. J. *Biomass Processing Technologies*. [S.l.]: CRC Press, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 1, 10, 11, 12, 20 e 29.

TUMULURU, J. S. e. a. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 2011. Citado na página 32.

T.WILLIAMS, P.; BESLER, S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy* 7, p. 233–250, 1996. Citado na página 12.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Energia*, v.14,n^o2, p. 67–85, 2008. Citado na página 3.

VELGHE, I. et al. Study of the pyrolysis of municipal solid waste for the production of valuable products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 92, p. 366–375, 2011. Citado na página 12.

VIEIRA, G. E. G. et al. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. *Revista Liberato* 15, p. 105–212, 2014. Citado na página 12.

VIEIRA, G. G. et al. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato* 12, p. 01–106, 2011. Citado na página 12.

VILASBOAS, M. A. et al. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. *Scientia Forestalis* 38, p. 481–490, 2010. Citado na página 7.

VOCA, N. et al. Proximate, ultimate, and energy values analysis of plum biomass by-products case study: Croatia's potential. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18, p. 1655–1666, 2016. Citado na página 11.

WANNAPEERA, J.; FUNGTAMMASAN, B.; WORASUWANNARAK, N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, p. 99–105, 2011. Citado na página 22.

YAN, W. et al. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Environmental Progress Sustainable Energy* 28, p. 435–440, 2009. Citado na página 13.

ZANETTI, E. A. *Indicadores para a avaliação do manejo florestal sustentável - A Amazônia brasileira no cenário mundial*. 338 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Citado na página 3.

ZHANG, J.; KAMDEM, D. P. Ftir characterization of copper ethanolamine—wood interaction for wood preservation. *De Gruyter*, 2005. Citado na página 30.