

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**Desempenho Energético e Mecânico de Pellets Torrefados de Resíduos
de Madeiras Amazônicas sob Manejo Sustentável**

Isabella de Andrade Sá
Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale
Coorientador: Prof. Dr. Edgar Silveira

Brasília, Distrito Federal

Agosto, 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

Isabella de Andrade Sá

**Desempenho Energético e Mecânico de Pellets Torrefados de Resíduos
de Madeiras Amazônicas sob Manejo Sustentável**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale
Coorientador: Prof. Dr. Edgar Silveira

Dedicatória

Dedico este trabalho in memoriam ao meu pai, pois sem o seu esforço, dedicação e amor, eu jamais me formaria a mulher que sou hoje, esse trabalho é nosso papai, com amor Bella.

Agradecimentos

Agradeço à Èsù, Òsún, Oyá e todos os Orixás e a ancestralidade, sem a força e o amor deles, que se fizeram presentes durante diversos momentos deste trabalho, eu jamais concluiria. Agradeço a minha mãe e irmãos, por todo apoio e confiança durante esses dois anos. Agradeço também ao meu pai espiritual Robert Marley que com todo amor e paciência me ajudou a enfrentar todos os medos e dúvidas que surgiram ao longo desta caminhada.

Agradeço aos meus amigos Léo, Vanessa, Duda e Josi por me aguentarem chorando, sorrindo e querendo sair correndo com medo de dar tudo errado, nunca deixaram de se preocupar e se fazer presente, Amo vocês. Agradeço ao meu namorado, amor sem você ao meu lado tudo isso seria muito mais difícil, te amo.

Agradeço aos meus orientadores Ailton e Edgar, por toda paciência, puxões de orelha (extremamente necessários), aprendizado e suporte durante este período. Agradeço ao pessoal do LPF, em especial ao Greg, Gustavo, Bruno e Lucélia pelas trocas, sugestões e diferentes pontos de vista, que foram cruciais para o andamento deste trabalho.

Agradeço a todo departamento de Pós-Graduação de Engenharia Florestal da UnB, aos funcionários da secretaria, e a todos os professores, em especial, aos professores: Ailton e Cláudio, que foram exemplos de profissionais e que fizeram total diferença. Por fim, agradeço a todos que passaram por minha vida durante este período e de certa forma contribuíram com essa pesquisa, a vocês o meu muito obrigado!

ÍNDICE

<i>Capítulo</i>	<i>Página</i>
Resumo	8
Abstract	9
1. Introdução	10
1.1 Objetivo	11
2. Referencial Teórico	12
2.1 Biomassa	12
2.1.1 Uso da biomassa como biocombustível	13
2.1.2 Composição da biomassa: celulose, hemiceluloses e lignina	17
2.1.3 Lignina, composição e estrutura química	18
2.1.4 Lignina e peletização	21
2.1.5 Propriedades da biomassa	23
2.2 Resíduos madeireiros: exploração e potencial energético	24
2.2.1 Exploração madeireira amazônica e sua produção de resíduos	25
2.2.2 Manejo Florestal sustentável	25
2.3 Pellets	26
2.3.1 Processo de produção de Pellets	27
2.3.2 Cenário mundial e nacional de produção, comercialização de pellets	31
2.3.3 Normas de produção de pellets: nacionais e internacionais	32
2.4 Torrefação	38
2.4.1 Parâmetros da torrefação	39
2.4.2 Processo de torrefação	40
2.4.3 Tipos de torrefação e produtos gerados	41
2.4.4 Torrefação e a decomposição dos compostos da biomassa: celulose, hemicelulose e lignina	44
3. Materiais e Métodos	45
3.1 Obtenção e caracterização das amostras para estudo	45
3.2 Caracterização do material in natura	46
3.2.1 Determinação do teor de umidade	46
3.2.2 Determinação do teor de cinzas	46
3.2.3 Determinação da densidade a granel	47
3.2.4 Determinação dos poderes caloríficos superior e inferior	47
3.3 Torrefação	48
3.3.1 Torrefação das espécies selecionadas para estudo	48
3.3.2 Determinação das propriedades da mistura de espécies submetida à torrefação	49
3.4 Peletização	49
3.4.1 Ensaios de peletização e análise dos pellets	49
3.4.2 Determinação do diâmetro e comprimento dos pellets	50

3.4.3 Determinação da durabilidade mecânica dos pellets	51
3.4.4 Determinação do teor de finos (partículas < 3,15 mm)	51
3.4.5 Determinação da densidade energética	52
3.4.6 Determinação do teor de voláteis e cinzas	52
3.4.7 Determinação do carbono fixo	52
3.4.8 Delineamento do Experimento	53
4. Resultados	53
4.1 Blend e pellets in natura	53
4.2 Pellets torrefados	55
4.2.1 Composição química imediata e umidade	55
4.2.2 Análise Energética	60
4.2.3 Análise Mecânica	61
4.2.4 Classificação dos pellets torrefados: norma ISO 17225-8	65
5. Conclusão	66
6. Referências Bibliográficas	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1. Formas de conversão da biomassa em diferentes tipos de biocombustíveis.	15
Tabela 2. Principais propriedades físico-químicas da biomassa consideradas durante sua análise para conversão em combustível.	23
Tabela 3. Especificações de qualidade de <i>pellets</i> de madeira para usos residencial e comercial, de acordo com a Norma ISO 17225-2.	34
Tabela 4. Especificações e classes de qualidade de <i>pellets</i> de madeira para uso industrial, de acordo com a Norma ISO 17225-2.	35
Tabela 5. Especificações e classes de qualidade de <i>pellets</i> produzidos a partir de madeira tratada termicamente, de acordo com a Norma ISO 17225-8 (2016).	36
Tabela 6. Relação das espécies de madeira que compõem a Mistura selecionada para o estudo.	46
Tabela 7 – Comparação entre os valores de referência exigidos pela norma ISO 17225-2 com os valores médios dos pellets para as seguintes propriedades: comprimento dos pellets (mm), teor de umidade (%), teor de cinzas (%), durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), densidade a granel (kg/m ³ b.u), poder calorífico superior (MJ/Kg b.u).	55
Tabela 8 – Médias dos resultados das análises aproximadas e coeficiente de variação (CV %) dos pellets torrefados a 200°C e 275°C.	56
Tabela 9 – Médias das variáveis energéticas e coeficiente de variação (CV %) dos pellets torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes propriedades: poder calorífico superior (MJ/Kg) e densidade energética (Mj/kg/m ³).	60
Tabela 10 – Teste Tukey de médias dos pellets in natura e pellets torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes variáveis: durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), comprimento dos pellets (mm) e densidade a granel (kg/m ³).	62
Tabela 11 – Comparação entre os valores de referência exigidos pela norma ISO 17225-8 nas classes TW1L e TW1H com os valores médios dos pellets torrefados a 200°C e 275°C, para as seguintes propriedades: comprimento dos pellets (mm), teor de umidade (%), teor de cinzas (%), durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), densidade a granel (kg/m ³ b.u), poder calorífico superior (MJ/Kg b.u).	664

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 – Principais características da biomassa para sua conversão bioquímica. Adaptação, (Elbersen <i>et al.</i> , 2017).	15
Figura 2 – Álcoois p-hidroxi-cinâmílicos, precursores da lignina: p-cumarílico, coniferílico e sinapílico (Klock, 2013a).	19
Figura 3 – Temperatura de transição vítrea (Tg) dos polímeros que compõem a madeira em função do teor de umidade (Olsson; Salmén, 1992)	21
Figura 4 - Representação das etapas do processo de peletização (Pradhavn <i>et al.</i> , 2018).	Error! Bookmark not defined.
Figura 5 - Etapas do processo de torrefação: (1) aquecimento inicial e secagem; (2) aquecimento intermediário; (3) torrefação e (4) resfriamento (Stelt, <i>et al.</i> , 2011; Junsatien <i>et al.</i> , 2012; Busu <i>et al.</i> , 2018).	40
Figura 6 - O gráfico representa os processos que ocorrem durante a degradação das hemiceluloses, celulose e ligninas (Cao <i>et al.</i> , 2019; Chen <i>et al.</i> , 2019; González Martínez <i>et al.</i> , 2022; Sarker <i>et al.</i> , (2021).	44
Figura 7 – Esquema representando o reator de torrefação laboratorial utilizado para torrefar a biomassa.	49
Figura 8 – <i>Pellets produzido a partir da mistura de resíduos torrefados de seis espécies de madeiras amazônicas. Da esquerda para direita: in natura, 200°C e 275°C.</i>	50
Figura 9 – Da esquerda para direita: in natura, médias dos pellets in natura e torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes variáveis: teor de umidade (%), teor de voláteis (%), teor de cinzas (%), e teor de carbono fixo (%).	56

RESUMO

A comercialização de pellets como produto de exportação, exige a adequação de sua qualidade para atendimento às normas internacionais e, neste sentido, o pré-tratamento, como a torrefação da biomassa *in natura* pode ser um caminho. O objetivo do presente estudo foi avaliar o potencial energético dos *pellets* produzidos a partir de uma mistura de resíduos de madeiras amazônicas, torrefadas, em duas temperaturas diferentes: 200°C e 275°C. Foi utilizada uma mistura de resíduos de seis diferentes espécies de madeiras tropicais (*Peltogyne lecointei* Ducke, *Martiodendron elatum* (Ducke) Gleason, *Handroanthus incanus* (A.H.Gentry) S.Grose, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., *Allantoma decandra* (Ducke) S.A. Mori et al. e *Erisma uncinatum* Warm). As blendas de biomassa foram torrefadas em duas temperaturas, 200 e 275°C, com taxa de aquecimento de 5°C/min e tempo de residência de 60 e 30 minutos, para cada temperatura, respectivamente. A biomassa torrefada foi posteriormente peletizada a uma taxa de alimentação da peletizadora que variou entre 10 e 15% da velocidade máxima da peletizadora, durante o processo. Foi verificada a influência da torrefação nas características mecânicas e energéticas dos *pellets* produzidos, a partir das avaliações das propriedades da norma ISO 17225-8 para este tipo de biocombustível. Os *pellets* produzidos a 200°C e 275°C apresentaram valores médios de poder calorífico e densidade energética de, respectivamente, 20,86 MJ/kg e 22,66 MJ/kg e de 9,66 GJ/m³ e 10,47 GJ/m³. Para durabilidade mecânica os pellets a 200°C e 275°C apresentaram valores médios de 78,36% e 63,11% estando ambas as temperaturas abaixo do recomendado pela norma para as classes TWH e TWL ($\geq 97,5\%$). Os pellets de 275°C, mostraram um aumento de 8,18% de densidade energética em relação aos pellets torrefados a 200°C. De modo geral, considerando todas as propriedades analisadas, os pellets de 200°C apresentaram melhores resultados.

Palavras chave: torrefação, madeiras tropicais, lignina, peletização.

ABSTRACT

Plant biomass is a promising source of renewable energy, but it requires some adjustments, such as pre-treatments, such as torrefaction, to improve its characteristics before being converted into a type of biofuel. The objective of this study was to evaluate the potential energy of pellets produced from a mixture of Amazonian wood residues, torrefied at two different temperatures: 200°C and 275°C. A mixture of residues from six different tropical wood species (*Peltogyne lecointei* Ducke, *Martiodendron elatum* (Ducke) Gleason, *Handroanthus incanus* (A.H.Gentry) S.Grose, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., *Allantoma decandra* (Ducke) S.A. Mori et al. and *Erisma uncinatum* Warm) were used, which were torrefied at two temperatures, 200 and 275°C with a heating rate of 5°C/min and residence time of 60 and 30 minutes, for each temperature, respectively. The torrefied biomass was subsequently pelletized at a pelletizer feed speed that varied between 10 and 15 during the process. The influence of torrefaction on the mechanical and energy characteristics of the pellets produced was verified, based on the evaluations of the properties of the ISO 17225-8 standard for this type of biofuel. The pellets produced at 200°C and 275°C presented average calorific value and energy density values of, respectively, 20,86 MJ/kg and 22,66 MJ/kg and 9,66 GJ/m³ and 10.47 GJ/m³ for the latter property; for mechanical resistance, the pellets at 200°C and 275°C presented average values of 78.36% and 63.11%, both temperatures being below the standard recommended for classes TWH and TWL (≥ 97.5); the pellets at 275°C showed an increase of 8,18% in energy density compared to the pellets torrefied at 200°C. In general, considering all the properties analyzed, the pellets at 200°C presented better results.

Keywords: torrefaction, tropical wood, lignin, pelletizing.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental é um tema recorrente atualmente, com o aumento da emissão de gases do efeito estufa, tem se mostrado necessário a redução do consumo de combustíveis fósseis. Neste contexto cresce a procura por combustíveis alternativos, renováveis e sustentáveis. A participação de fontes de energia renováveis na matriz energética, em níveis nacionais e internacionais, tem crescido gradualmente nos últimos anos. A biomassa, tanto agrícola quanto florestal, é um exemplo de fonte de energia renovável que pode ser utilizada para a geração de diferentes fontes de energia, como energia térmica e elétrica.

Entre os exemplos de fontes de energia renovável, a partir da biomassa, temos os combustíveis líquidos, como etanol e biodiesel e os combustíveis sólidos, temos os *pellets*, briquetes e o carvão vegetal. Os *pellets* são um tipo de biocombustível sólido granulado, compactado e denso, com baixo teor de umidade, permitindo elevada eficiência na combustão, utilizado no aquecimento residencial e também em indústrias como fonte de energia elétrica ou termoelétrica. (Garcia, et al., 2013). O consumo de *pellets* em substituição aos combustíveis fósseis foi incentivado pela necessidade de vários países de reduzirem a emissão de gases de efeito estufa (Cupertino, 2017).

A produção de *pellets* de resíduos do processamento de madeiras tropicais já é uma realidade, e traz resultados promissores. Em um estudo com pellets das espécies de madeiras tropicais *Acacia wrightii*, *Ebenopsis ebano* e *Havardia pallens*, Artemio et al. (2018), observaram alta densidade energética e durabilidade mecânica superior a 97,5%. Estes resultados indicam que os pellets de resíduos de madeiras tropicais apresentam potencial para serem utilizados como combustível nos setores comercial e industrial.

A utilização de pellets como fonte energética encontra alguns gargalos relacionados a sua produção e viabilidade econômica, pois estes dependem da disponibilidade, quantidade e qualidade da matéria prima, distâncias de transporte entre fábricas e fonte de matéria prima, tarifas de energia e a capacidade instalada da fábrica. Para contornar alguns desses problemas referentes a qualidade da matéria prima, alguns pré-tratamentos são feitos com a biomassa antes do processo de peletização, como por exemplo a torrefação (Rendeiro & Nogueira, 2008).

A torrefação é um processo térmico que degrada a biomassa em atmosfera inerte ou parcialmente inerte, e tem como resultado a concentração de carbono fixo, diminuição

do teor de voláteis e aumento do teor de cinzas comparado a biomassa in natura (Bergman *et al.*, 2005). Entre os componentes da biomassa que são degradados durante a torrefação, a celulose e as hemiceluloses têm uma degradação mais rápida comparada à lignina.

A lignina possui característica termoplástica, isso significa que ao atingir certa temperatura, acaba se tornando maleável, esse amolecimento é o ponto de transição vítrea que varia conforme a espécie, temperatura e umidade da biomassa (Klock, *et al.*, 2005; Thakur, 2013; Figueroa & Moraes, 2009). Essa característica é interessante do ponto de vista da peletização, porque pode funcionar como um adesivo natural entre as partículas durante o processo.

O interesse na torrefação vem aumentando a dia na produção de *pellets* de madeira e sua tecnologia representa uma operação unitária adicional na cadeia de utilização de biomassa e desempenha um papel significativo no desenvolvimento do setor de energia de biomassa e outras indústrias (Olugbade, 2020a).

1.1 Objetivo

Avaliar o potencial energético de *pellets*, produzidos a partir de uma mistura de resíduos de madeiras amazônicas, torrefados 200°C e 275°C e classificá-los de acordo com a norma ISO 17225-8 (2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biomassa

Biomassa, do ponto de vista energético, é definida como qualquer material, que não seja combustível fóssil, advindo de um ser vivo (planta, animal, alga, ou resíduo orgânico) que pode ser usado como combustível diretamente ou após conversão. Ela pode ser dividida em biomassa lignocelulósica, que é biomassa vegetal e biomassa não lignocelulósica (Hassan et al., 2018; Vassilev *et al.*, 2012). É uma fonte de energia renovável, que pode ser convertida em diferentes tipos de biocombustíveis por meio de processos químicos ou termo químicos que são capazes de alterar suas propriedades (Wang *et al.*, 2017a).

A biomassa é considerada importante fonte de energia renovável, devido ao seu ciclo de vida curto e, também, caracteriza-se como combustível neutro em carbono. Todo carbono que ela possui vem da atmosfera e é liberado durante sua queima, voltando ao meio ambiente. Isto, aliado ao fato de que ela está disponível na natureza em quantidades significativas faz com que ela seja uma alternativa de uso frente aos combustíveis fósseis (Arpia *et al.*, 2021; Li et al., 2019).

As tendências globais para o desenvolvimento de biocombustíveis têm evoluído no sentido do desenvolvimento de tipos mais versáteis de biocombustíveis, bem como na exploração mais eficaz de fontes emergentes de matéria-prima. Além disso, a necessidade de atender aos requisitos de sustentabilidade e até mesmo de certificação tem sido enfatizada por governos e consumidores (Lin et al., 2021).

Estudos sobre o uso da biomassa como alternativa ao uso de combustíveis fósseis vêm crescendo nos últimos anos, e o conhecimento de suas principais características é fundamental, do ponto de vista energético, para o seu melhor aproveitamento (Yoo *et al.*, 2020). Seu potencial energético depende de alguns fatores, como por exemplo, a geografia (localização do material e do local de conversão da biomassa em combustível), disponibilidade de recursos (quantidade de material disponível), biodiversidade, tecnologia e economia (Antar *et al.*, 2021).

A biomassa lignocelulósica é a fonte de carbono mais abundante produzida na Terra e desempenha um papel fundamental no ciclo do carbono nos ecossistemas (Im *et al.*, 2022). Por ser considerada uma fonte de carbono renovável, ela pode ser usada de

diversas formas para geração de calor, eletricidade, como combustíveis e outros subprodutos de valor agregado (Yogalakshmi *et al.*, 2022). A considerar a sua origem, a biomassa pode ser dividida em duas grandes categorias: natural ou residual e derivada de outros materiais.

Biomassa lignocelulósica é constituída majoritariamente, cerca de 85-90%, por celulose, hemiceluloses e lignina, e em menor proporção por outros componentes orgânicos e inorgânicos tais como, resinas, ácidos, gorduras e óleos, água (umidade) e cinzas. A quantidade destes componentes e suas proporções associados a outras características da biomassa, determinam o melhor tipo de biomassa para um determinado sistema de conversão (Elbersen *et al.*, 2017; Pasangulapati *et al.*, 2012).

Os tipos de biomassa lignocelulósicas, engloba a biomassa florestal e agrícola além da biomassa residual que inclui resíduos industriais e urbanos, tais como: madeira e resíduos de madeira, culturas agrícolas e seus subprodutos, resíduos sólidos urbanos, resíduos de processamento de alimentos e plantas aquáticas e algas (Goyal *et al.*, 2008).

A biomassa florestal utilizada na indústria, em sua maioria é proveniente de florestas de espécies arbóreas de crescimento rápido com curtos períodos de rotação. Por outro lado, a biomassa não florestal é caracterizada por possuir menor teor de lignina, menor poder energético e menor densidade, este tipo de biomassa é abundante e com baixo custo o que favorece a sua utilização (Yousuf *et al.*, 2019).

Neste sentido, os resíduos da biomassa também se mostram como uma alternativa de produção sustentável de produtos químicos e biopolímeros, já que estes tipos de produtos dependem inteiramente do carbono renovável. Portanto, este tipo de resíduo se apresenta como um recurso alternativo à criação destes produtos, além de conferi-lhes valor agregado. A valorização dos resíduos de biomassa fundamenta-se na utilização de constituintes químicos, como frações de carboidratos e não-carboidratos da biomassa, para produzir produtos comercialmente viáveis (Cho *et al.*, 2020).

2.1.1 Uso da biomassa como biocombustível

Biocombustíveis são produzidos a partir de fontes renováveis, como por exemplo resíduos de exploração florestal e de culturas agrícolas, e são uma alternativa ao uso dos combustíveis fósseis (Cho *et al.*, 2020). Dentre as vantagens do uso da biomassa como combustível, destaca-se o fato de poder ser convertida em diferentes tipos de

combustíveis (sólido, líquido ou gasoso) e, também, ser utilizada em cogeração com outros combustíveis fósseis para redução das emissões de gases poluentes (Sivabalan *et al.*, 2021). Os biocombustíveis têm potencial para ser uma nova fonte de energia sustentável e, em harmonia com o ambiente, fator este que desempenha papel único na consolidação deste tipo de produto na bioeconomia (Zhang & Zhang, 2019).

Os biocombustíveis são classificados de forma geral, entre primários ou não processados, que são aqueles que são usados diretamente, a partir da sua queima como a lenha, por exemplo; e os secundários ou processados, que são aqueles onde a biomassa sofre transformações químicas, físicas e ou térmicas para então ser utilizada, tais como o carvão vegetal e o biodiesel. Os biocombustíveis secundários podem ser subdivididos de acordo com o tipo de biomassa e a tecnologia de transformação, em biocombustíveis de primeira, segunda ou terceira geração (Lin & Lu, 2021; Sharma *et al.*, 2019). Outra forma comum de classificação é conforme a forma do combustível, podendo ser líquido, como o biodiesel, sólido como os pellets ou ainda gasosos como os gás de síntese.

O uso da biomassa como combustível, traz algumas vantagens, além de ser uma fonte de energia renovável, o que contribui para a diversificação da matriz energética, o seu uso contribui para o aproveitamento de resíduos vegetais e sua queima emite menos gases tóxicos que combustíveis fósseis (Vassilev *et al.*, 2012). Por outro lado, a biomassa *in natura*, apresenta, em geral, alta umidade, baixa densidade energética e maior volume e, conseqüentemente, dificuldade de armazenamento e transporte. Contudo, essas desvantagens podem ser contornadas com pré-tratamentos, antes da conversão da biomassa (Chen & Kuo, 2010).

Algumas características são essenciais para o sucesso dos pré-tratamentos da biomassa, eles devem ter um baixo custo financeiro e operacional, além de serem eficazes, abrangendo diferentes tipos de material lignocelulósicos, além de resultar na recuperação da maioria dos componentes da biomassa mantendo utilizável (Agbor *et al.*, 2011).

Os tipos de pré-tratamentos biomassa lignocelulósica podem ser físicos, químicos e biológicos, ou ainda uma combinação destes dois últimos, onde o principal objetivo é a quebra dos polímeros e macromoléculas que compõem a biomassa (celulose, hemicelulose e lignina) para facilitar sua transformação em produtos de maior valor

agregado e com maior rendimento (Sharma et al., 2019). Os tipos de conversão da biomassa mais comuns são exemplificados na Tabela 1.

Tabela 1. Formas de conversão da biomassa em diferentes tipos de biocombustíveis (Saravanan et al., 2002; Tu & Hallett, 2019).

Formas de conversão da biomassa				
Física	Química	Físico-química	Biológica	Termoquímica
Mecânica	Ácido	Explosão a vapor	Bacteriana	Torrefação
Moagem	Alcalino	Auto hidrólise	Fúngico	Carbonização
Ultrassom	Líquido iônico	Hidrotermal	Enzimático	Pirólise
Eletro cinético	Solvente orgânico			

O processamento da biomassa lignocelulósica ou microbiana, bem como de uma ampla gama de resíduos podem produzir uma variedade de produtos tidos como “energia limpa” ou “energia verde” (Gouveia & Passarinho, 2017). A biomassa lignocelulósica pode ser convertida em energia ou produtos energéticos, por diversas rotas de conversão, as mais comuns são vias termoquímicas e bioquímicas (Wang et al., 2017).

A conversão bioquímica da biomassa consiste, em geral, de uma etapa de pré-tratamento para libertar os açúcares C6 e C5, seguida pela conversão dos polissacarídeos em produtos como combustíveis ou produtos químicos. As características fundamentais da biomassa que influenciam positivamente a conversão bioquímica da biomassa lignocelulósica em combustíveis e produtos químicos são baixo teor de lignina, alto teor de carboidratos e baixo teor de componentes inorgânicos (Figura 1).

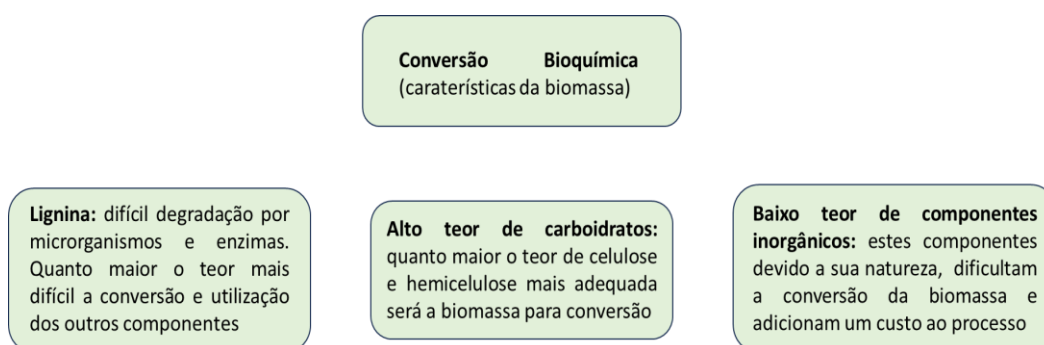


Figura 1 – Principais características da biomassa para sua conversão bioquímica. Adaptação, (Elbersen *et al.*, 2017).

A conversão bioquímica envolve microrganismos que metabolizam a biomassa utilizando tecnologias como compostagem, fermentação e digestão anaeróbica e como resultado produzem biocombustíveis e bioprodutos como álcoois, ácidos graxos e gases. Dentre estas técnicas, a de compostagem é utilizada desde tempos imemoriais para converter a biomassa em biofertilizante, já os processos de digestão anaeróbica e fermentação foram desenvolvidos posteriormente para produzir biocombustíveis e bioprodutos (Awasthi *et al.*, 2023).

Embora a conversão bioquímica de biomassa em biocombustíveis tenha tido avanços, um dos principais gargalos que impedem a produção de biocombustíveis economicamente viáveis a partir de biomassa renovável é a falta de processos de pré-tratamento rentáveis para quebrar a estrutura refratária das paredes celulares vegetais para posterior tratamento enzimático, hidrólise e fermentação microbiana (Zheng *et al.*, 2017a).

A conversão da biomassa em combustível pela via termoquímica, consiste em uma fonte de calor e diferentes concentrações de oxigênio, que são modificados gerando diferentes tipos de produtos (Osman *et al.*, 2021). A maior parte das tecnologias de conversão termoquímica concentra-se na produção de biocombustíveis de segunda geração, ou seja, utiliza-se principalmente biomassa lignocelulósica como matéria-prima para a geração de biocombustíveis. A conversão termoquímica é dividida em quatro principais rotas: torrefação, pirólise (lenta e flash), combustão e gaseificação (Ong *et al.*, 2020).

A conversão termoquímica utiliza principalmente biomassas lignocelulósicas, isso porque ela é constituída principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina que são componentes que se degradam em altas temperaturas. As hemiceluloses são moléculas que são decompostas, mais facilmente, em uma faixa de temperatura de 200°C a 380°C. Já a celulose se decompõe entre 320°C e 400°C. A lignina é o componente mais estável, começa a se decompor em uma faixa de temperatura a partir de 180°C. Contudo, a perda de massa da macromolécula de lignina em temperaturas baixas é mínima. A eficiência deste processo depende de muitos fatores, como propriedades da matéria-prima, tipo de reator e condições inerentes à reação, como temperatura, atmosfera (Pasangulapati *et al.*, 2012; Zhang & Zhang, 2019).

A eficiência dos processos termoquímicos depende de muitos fatores, como propriedades da matéria-prima, tipo de reator e condições inerentes à reação, como temperatura, atmosfera (Pasangulapati *et al.*, 2012; Zhang & Zhang, 2019). Como vantagens da conversão termoquímica da biomassa, frente a conversão bioquímica, pode-se citar a utilização de qualquer biomassa durante o processo de conversão, aumentando assim a variedade de combustíveis gerados, maior produtividade, independência das condições climáticas (Verma *et al.*, 2012).

Existem desafios para além dos custos adicionais ao utilizar as rotas termoquímicas e bioquímicas, de forma conjunta, por exemplo, a utilização de catalisadores ou solventes nas rotas térmicas pode resultar no envenenamento ou na morte dos microrganismos ou gerar vários inibidores que podem afetar as rotas de conversão bioquímicas (Osman *et al.*, 2021).

2.1.2 Composição da biomassa: celulose, hemiceluloses e lignina

A biomassa lignocelulósica é composta essencialmente por três compostos orgânicos: celulose, hemiceluloses e lignina e pequenas frações de extrativos, a proporção destes compostos varia de acordo com o tipo (herbácea e florestal) e a espécie da biomassa (Yu *et al.*, 2017). A celulose, as hemiceluloses e a lignina compõem a parede celular das plantas, em diferentes camadas, e com isso conferindo integridade e rigidez a elas (Calvo-Flores & Dobado, 2010). A parede celular vegetal possui camadas em que as microfibrilas apresentam diferentes organizações e proporções de celulose, hemiceluloses, pectinas e lignina (Mellerowicz & Sundberg, 2008).

Em geral, a quantidade de celulose varia entre 40 e 60%, hemiceluloses tem variação entre 15 e 30% e lignina entre 10 e 25% base massa seca (Wang *et al.*, 2017). Saber a quantidade destes componentes na biomassa e a suas interações, é importante para a escolha no melhor tipo de tratamento para conversão da biomassa em biocombustíveis.

A celulose é o principal polímero estrutural da parede celular de uma planta e, geralmente, é composta por microfibrilas (Pasangulapati, 2012) e apresenta-se como um polímero de cadeia longa com porções β -D-glucopiranosose ligadas por meio de ligações glicosídicas β -(1,4).

As hemiceluloses são polissacarídeos presentes nas paredes celulares primárias e secundárias de todas as plantas e de algumas algas marinhas (Rao *et al.*, 2023). Elas são polímeros complexos com ramificações curtas ligadas por ligações beta-(1,4)-glicosídicas e ocasionalmente ligações beta-(1,3)-glicosídicas. As hemiceluloses são constituídas por açúcares como pentoses: arabinose e xilose, hexoses: manose, glicose e galactose e ácidos urânicos: α -D glucurônico, ácido α -D-galacturônico e α -D-4-O-metilgalacturônico (Im *et al.*, 2022; Qaseem *et al.*, 2021).

A lignina é uma macromolécula presente em plantas que em conjunto com a celulose e as hemiceluloses, constroem a parede celular em um arranjo que resulta em estruturas de rede de carboidratos e de lignina (Gellerstedt & Henriksson, 2008). A macromolécula de lignina possui grupos metoxílicos, hidroxílicos, carboxílicos e carbonílicos. Os grupos metoxílicos e hidroxílicos ocorrem em maior proporção na macromolécula com um polifenol reticulado e alguns grupos aldeídos terminais nas cadeias laterais (Zhang & Naebe, 2021).

2.1.3 Lignina, composição e estrutura química

A lignina compõe as estruturas das células fornecendo força e rigidez (Wang *et al.*, 2017). Ela possui vários grupos estruturais com diferentes grupos hidroxila, álcool benzílico, éter benzílico não cíclico, grupos carbonila e grupos metoxila que acabam afetando na sua reatividade, tanto química quanto termicamente (Katahira *et al.*, 2018).

A estrutura básica da lignina é composta por um anel aromático e unidades de propano e consiste em estruturas p-hidroxifenila, guaiacil e siringil conectadas com átomos de carbono em unidades fenilpropanóides. Possui grupos funcionais metoxílicos (OCH₃), hidroxílicos (OH) e carboxílicos (COOH) e, de modo geral, moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio formam sua composição básica (Figura 2). No entanto, sua estrutura química não é totalmente conhecida devido ao fato de não ser uma molécula estável, sofrendo alterações durante o processo de isolamento dos demais componentes da biomassa (Klock, 2013b)

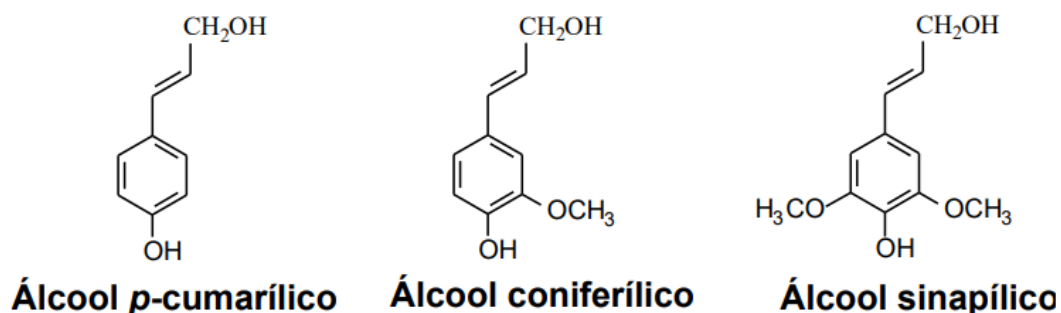


Figura 2 – Álcoois p-hidroxi-cinamílicos, precursores da lignina: p-cumarílico, coniferílico e sinapílico (Klock, 2013a).

Do ponto de vista estrutural, a lignina é um polímero amorfo, com estrutura altamente complexa e primariamente aromática, essencialmente termoplástico, cujo principal ponto de amolecimento é aquele da transição vítrea além disso é um componente estrutural que dá à madeira propriedades de elasticidade e resistência bastante únicas (Klock, & Andrade, 2013b; Thakur, 2013; Figueroa & Moraes, 2009).

Por ser um polímero complexo, o processo de isolar a lignina da madeira ou de outros tipos de biomassa, começa com a desintegração mecânica do material, geralmente uma moagem e durante este processo as camadas celulares ao nível macromolecular são eliminadas e, a partir do material resultante; em seguida este material passa pela extração com algum tipo de solvente com dioxano e então se obtém uma estrutura média de lignina. Na maioria dos procedimentos de isolamento, durante o processo há perdas e a lignina contém pequenas impurezas de carboidratos (Gellerstedt & Henriksson (2008).

As transformações químicas e estruturais da lignina induzidas por processos térmicos como a torrefação mostram que as reações de fragmentação, despolimerização, condensação e desmetoxilação ocorrem acompanhando as clivagens das principais ligações deste polímero (Wen *et al.*, 2014).

A termoplasticidade da lignina faz com que ela atue como um aglutinante durante a peletização, fluindo entre as partículas e preenchendo as fissuras e espaços vazios e como este processo só ocorre ao atingir a temperatura de transição vítrea, temperaturas inferiores a esta podem gerar *pellets* com fissuras e, conseqüentemente, menos resistentes (Stelte *et al.*, 2012).

A transição vítrea da lignina está ligada à temperatura, ao teor de umidade, ao seu peso molecular e à forma à qual ela se apresenta, isolada ou incorporada à madeira. Com relação ao teor de umidade, quando este aumenta, a temperatura da transição vítrea diminui, tendendo a uma temperatura limite, na qual a umidade não exerce um efeito significativo (Figuerola & Moraes, 2009).

A lignina é normalmente aquecida a temperaturas acima de sua transição vítrea para facilitar seu processamento na indústria. As suas movimentações durante o aquecimento, envolvem principalmente movimentos internos, abaixo da temperatura de transição vítrea, e os movimentos intermoleculares, que tem início com a temperatura acima da temperatura de transição vítrea (Vural et al., 2018).

Durante o aquecimento, a lignina apresenta três estados, o vítreo, o elástico e o plástico. No estado vítreo, com o aumento da temperatura e conseqüentemente o aumento da energia interna, algumas moléculas podem oscilar e com isso alguns elementos dessas moléculas podem se mover e se deformar, mas mantendo suas posições dentro da molécula; já o estado elástico é caracterizado por um alto grau de deformação reversível da lignina. Com o aquecimento e o aumento da energia interna, a lignina passa para condição plástica onde suas moléculas se movem umas em relação às outras e os polímeros fluem (Börcsök & Pásztory, 2021).

Durante a torrefação, Pelaez-Samaniego *et al.*, (2014) observaram que nas diferentes temperaturas há a formação de um líquido rico em lignina que migra do interior para a superfície das células da madeira, se mostrando um adesivo natural na produção de pellets, por exemplo. Oh *et al.* (2019), verificou que durante a torrefação a 260°C houve efeito significativo na distribuição de lignina pelas partículas do material torrefado.

Com relação a umidade, alguns elementos adicionados a biomassa durante o pré-tratamento térmico podem reduzir a umidade e, conseqüentemente, diminuir o ponto de fusão da lignina. O estudo com Ca (OH)₂ adicionado a biomassa mostrou que durante o processo de torrefação, as reações de condensação foram intensificadas, diminuindo o teor de umidade do material, entretanto esse efeito positivo diminui conforme aumenta a temperatura de torrefação (Su *et al.*, 2022). Isso significa que a depender da umidade do material e da temperatura usada durante a torrefação, a lignina pode se comportar como um aglutinante natural.

2.1.4 Lignina e peletização

De acordo com (Olsson & Salmén, 1992), a temperatura de transição vítrea da lignina (T_g) anidra, quando isolada da madeira, pode variar entre 120°C e 190°C, com maiores valores associados às ligninas de maior peso molecular. Esse autor estima que a lignina em seu estado natural incorporada à madeira apresenta T_g igual ou superior a 205°C.

A lignina é um polímero, que quando aquecido à temperatura de transição vítrea, “amolece” se tornando maleável tal qual um adesivo. De acordo com (Klock, 2013b) isso ocorre porque com o aumento da temperatura até a temperatura de transição vítrea, as cadeias poliméricas deslizam umas sobre as outras, e quando uma força é aplicada, aumenta consequentemente a área de contato entre elas. Segundo o mesmo autor, é de se esperar que o comportamento adesivo da lignina varie com a temperatura. Com relação ao teor de umidade, quando este aumenta, a temperatura da transição vítrea diminui, tendendo a uma temperatura limite, na qual a umidade não exerce um efeito significativo (Figuroa & Moraes, 2009).

A Figura 3 mostra os resultados obtidos por Olsson & Salmén (1992), compilados por Navi & Dick (2012), sobre efeito do teor de umidade na temperatura de transição vítrea da lignina e dos outros polímeros que compõem a madeira.

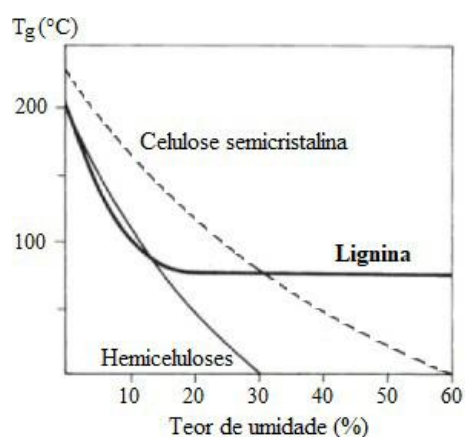


Figura 3 – Temperatura de transição vítrea (T_g) dos polímeros que compõem a madeira em função do teor de umidade (Olsson; Salmén, 1992)

Por ser termoplástica, a lignina atua como aglutinante durante a peletização, fluindo entre as partículas e preenchendo as fissuras e espaços vazios (Ferreira et al., 2018; Stelte et al., 2011). Desse modo, temperaturas inferiores à temperatura de transição

vítrea durante o ensaio poderiam dificultar o amolecimento da lignina, gerando pellets com fissuras e, portanto, menos resistentes.

Nielsen et al., (2008), avaliaram o efeito da adição de lignina kraft durante a peletização de serragem de pinus e encontraram efeitos positivos na resistência mecânica dos pellets. Além disso, o teor de umidade do material interfere na plasticidade da lignina, diminuindo a temperatura de transição vítrea deste polímero (Stelte *et al.*, 2011). Por essa razão ajustar o teor de umidade do material torreficado pode facilitar o processo de peletização.

Ainda há poucos estudos sobre o impacto da torrefação no comportamento da lignina na madeira. O estudo conduzido por (Pelaez-Samaniego et al., 2013) mostrou que ao tratar a madeira termicamente com água quente, observou-se, com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), pequenas estruturas esféricas, gotículas de lignina, presentes na superfície da biomassa após tratamento térmico.

Esse fenômeno foi atribuído à migração e aderência da lignina na superfície das células da madeira e uma das hipóteses que o justifica, é de que uma vez que a temperatura do tratamento ultrapasse a temperatura de transição vítrea da lignina esta é fluidizada e se torna aderente às paredes das células. A lignina no estado fluido adquire mobilidade devido à capilaridade e forças hidrofóbicas e migra para a fase líquida. A lignina aderida pode endurecer após o resfriamento e ficar presa dentro das camadas da parede celular ou ficar depositada na superfície do material tratado.

(Pelaez-Samaniego et al., 2014), avaliaram o efeito da temperatura de torrefação da madeira na formação de compostos oriundos da lignina. Os autores observaram que a partir de 225°C esses compostos começam a migrar da parede celular e da lamela média, formando depósitos na superfície das fibras e/ou na superfície interna da parede celular secundária, os quais podem facilitar a aglutinação das partículas durante a peletização de resíduos de madeira.

O limite superior para torrefação é normalmente de 300°C justamente para limitar a quantidade de decomposição da lignina, de modo que ela possa ser usada como aglutinante durante a peletização do material torrefado, pois em temperaturas acima de 300°C, a lignina e a celulose se decompõem em carvão e voláteis. A remoção de umidade por meio de pré-tratamento térmico é essencial, portanto, a conversão eficiente da lignina é muito importante para a utilização dos recursos de biomassa. (Su *et al.*, 2022).

Em um estudo com pellets de pinus torreficados a 250, 275 e 300°C, Stelte et al., 2011, concluíram que a torrefação, por degradar os polímeros presentes na biomassa (celulose, hemiceluloses e lignina), acabou por reduzir fortemente a capacidade de estabelecer ligações de hidrogênio entre cadeias poliméricas de partículas adjacentes. Os autores ressaltam ainda que a falta de umidade no material torreficado aumenta a temperatura de transição vítrea da lignina e restringe a sua fluidez, reduzindo o estabelecimento de pontes sólidas entre partículas.

Nanou et al. (2018), verificaram o efeito positivo da torrefação de madeira de pinus em relação à lignina, facilitando a peletização, desde que o processo ocorra logo após a torrefação. Segundo os autores, ao armazenar a madeira de pinus torreficada e posteriormente peletizá-la, ocorre uma redução na capacidade de ligação da lignina, produzindo pellets com qualidade inferior.

2.1.5 Propriedades da biomassa

As principais propriedades físico-químicas da biomassa que são consideradas durante a análise para a sua conversão em combustível, estão exemplificadas na tabela 2.

Tabela 2. Principais propriedades físico-químicas da biomassa consideradas durante sua análise para conversão em combustível.

Propriedades da biomassa	da Implicações
Densidade	Interfere no armazenamento, transporte e processamento do material in natura
Friabilidade	Tem relação com a capacidade de moagem da biomassa
Umidade	Afeta o transporte, armazenamento e a eficiência do processo de conversão em combustível
Teor de cinzas	Quando alto, pode acumular nos equipamentos de queima e ocasionar problemas de corrosão e deposição.
Material volátil	Influenciam na eficiência de conversão da biomassa em biocombustíveis
Composição química	
Decomposição térmica	
Conteúdo energético	Impacta diretamente na recuperação de energia

(Cai et al., 2017)

As propriedades da biomassa variam conforme a espécie, e as proporções de elementos químicos, como carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), em cada uma delas. A quantidade desses elementos na biomassa, acaba interferindo nas suas propriedades, em especial no poder calorífico, que é uma das variáveis energéticas a ser considerada durante a análise para escolha do uso final da biomassa (Tao *et al.*, 2012).

O poder calorífico é uma das principais características energéticas a ser analisada quando se trata do uso da biomassa como combustível. Ele é definido como a quantidade de calor liberado resultante da queima completa de uma unidade de massa do combustível (Uzun *et al.*, 2017). Uma das características que influenciam negativamente essa propriedade é o alto teor de umidade da biomassa, porque parte da energia da combustão do material é utilizada para evaporar a água do material, reduzindo assim o seu poder calorífico (Deboni *et al.*, 2019).

2.2 Resíduos madeireiros: exploração e potencial energético

A região amazônica é grande produtora de madeira, mas o desdobro da madeira serrada na região amazônica brasileira apresenta baixo rendimento, entre 25% e 30% do volume total da tora. A baixa tecnologia e mão de obra pouco especializada, empregadas durante a etapa do desdobro, explicam esse rendimento, o que resulta em grande produção de resíduos madeireiros, que acabam se acumulando e se tornando um passivo ambiental (Valdiones *et al.*, 2022; Aguiar *et al.*, (2022); Stragliotto *et al.*, 2020).

Um dos principais empecilhos na utilização energética dos resíduos resultantes do desdobro de madeiras amazônicas é a falta de conhecimento técnico sobre as propriedades físicas e químicas das espécies que os compõem. As recomendações gerais para utilização dos resíduos são a utilização de pré-tratamentos para secagem e a realização de estudos que avaliem os efeitos químicos e físicos das espécies bem como suas misturas, efeitos do armazenamento em diferentes posições da pilha a fim de aumentar o desempenho energético e agregar valor aos resíduos (Mesquita *et al.*, 2024; Morais *et al.*, 2024).

O Brasil possui a Lei nº12.305 de 2010 (BRASIL, 2010) que versa sobre os resíduos sólidos e sua apropriada destinação e forma de aproveitamento ambientalmente adequada, podendo esta ser a sua reutilização, reciclagem, aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes. Sua disposição final deve

observar as normas operacionais específicas para evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos. Uma das formas de aproveitamento deste tipo de resíduo é a sua utilização na produção de biocombustíveis sólidos como briquetes e pellets, por exemplo.

2.2.1 Exploração madeireira amazônica e sua produção de resíduos

A matriz energética brasileira tem se modificado nos últimos anos, com o aumento da participação de biocombustíveis como uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, neste contexto, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), empresa pública brasileira vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem desempenhado importante papel em dar maior visibilidade ao potencial de aproveitamento energético de resíduos da exploração madeireira. Os resíduos amazônicos apresentam diferentes propriedades físico-químicas que favorecem o seu uso como combustível, demonstrando assim o seu grande potencial para geração de energia (Araujo *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ambiental o aproveitamento de resíduos reduz um passivo ambiental além de ser uma alternativa adequada para o abastecimento de sistemas isolados de energia em alguns estados que compõem o território amazônico brasileiro (Lima *et al.*, 2021).

Como forma de incentivo ao uso de biocombustíveis, o Programa Combustível do Futuro, instituído pela Resolução CNPE nº 7, de 20 de abril de 2021, foi criado com o objetivo de aumentar a participação de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, integrando diversas políticas públicas, como o RenovaBio, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, o Programa Nacional de Etiquetagem Veicular e o Rota 2030 (EPE, 2023).

2.2.2 Manejo Florestal sustentável

Na legislação brasileira a Lei nº 11.284 de 2006 (BRASIL, 2006), dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Nesta lei, é definido como manejo florestal sustentável, “a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema da floresta e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal”.

A produção de madeira tem sido associada às emissões de CO₂ desde 2014 e, portanto, está conectada à mudança no uso da terra. Os produtos de madeira e os resíduos de madeira estão ligados não apenas a fatores socioeconômicos, mas também à degradação florestal e às emissões de CO₂ (Silva et al., 2023). Uma das maneiras de diminuir os danos causados pela exploração indevida da floresta por meio do desmatamento ilegal é a adoção de manejo sustentável.

O manejo florestal sustentável é uma forma de combater o aumento constante do desmatamento ilegal na região. A exploração de florestas nativas se torna uma atividade imprecisa quanto às condições da matéria-prima, já que o meio ambiente se encarrega de alterações ecológicas contínuas, imprimindo características aos indivíduos florestais, que para os interesses industriais, não se tornam viáveis economicamente (Medeiros *et al.*, 2023).

2.3 Pellets

A compactação de resíduos por meio da peletização é um importante instrumento de viabilização do uso da biomassa residual para energia, na medida em que disponibiliza um combustível com maior densidade energética, baixo teor de umidade, tamanho e qualidade uniformes, alta resistência mecânica e, portanto, de fácil manuseio, transporte e armazenamento (Bhattacharya et al., 1989).

Pellets são definidos como um tipo de biocombustível sólido e granulado, resultado da compactação de resíduos vegetais. Os *pellets* possuem como características o baixo teor de umidade, o que permite a elevada eficiência na sua combustão, além de maior densidade energética; sua principal aplicação é no aquecimento comercial ou residencial de ambientes, mas, também, é utilizado como combustível para a geração de energia elétrica em plantas industriais ou em usinas termoelétricas (Garcia, et al., 2013). Uma das grandes vantagens de utilização dos *pellets* para fins energéticos frente a biomassa *in natura*, está no fato de que, eles apresentam vantagens significativas em termos de transporte, armazenamento e uso (Zhang *et al.*, 2022).

Os *pellets* de madeira são um tipo de biocombustível tidos como uma alternativa de combustível renovável para substituir o carvão mineral em instalações de geração de calor e energia. Eles são normalmente fabricados a partir de serragem ou resíduos agrícolas celulósicos sob alta pressão. Enquanto o teor de umidade da biomassa varia, em

termos gerais, entre 10 – 18%, o teor de umidade dos pellets varia entre 2–8% de acordo com o tipo de biomassa processada. Eles têm formato cilíndrico com superfície lisa e seu diâmetro varia de 6 a 8 mm e comprimento de 18 a 24 mm, seu processo de fabricação se dá a partir de biomassa que é pulverizada por meio de rolo e matriz com furos (Bajwa *et al.*, 2018a; Lee *et al.*, 2020).

2.3.1 Processo de produção de Pellets

Durante o processo de peletização ocorre o adensamento da biomassa, que é colocada em uma máquina peletizadora que contém um rolo e uma matriz com furos, este rolo comprime o material contra uma placa de metal aquecida (devido ao atrito da biomassa com o rolo), resultando assim nos *pellets*, que saem aquecidos da máquina e posteriormente são resfriados e armazenados (Bajwa *et al.*, 2018b).

Durante o processo de peletização parâmetros como diâmetro do canal de prensagem, pressão da peletização, temperatura da peletizadora, teor de umidade da biomassa, tamanho da partícula e presença, ou não de aditivos, devem ser analisados e considerados para o melhor aproveitamento da biomassa e do produto final

O diâmetro de um canal de prensagem varia dependendo do diâmetro do produto desejado, geralmente entre 6 e 8 mm para um pellet de biomassa. O comprimento do canal de prensagem e a relação entre comprimento e diâmetro, também conhecida como taxa de compressão ou relação de aspecto, é o fator mais importante que influencia a pressão gerada no canal de prensagem de uma peletizadora. Para a produção de pellets de madeira, a proporção é geralmente 6 (Djatkov *et al.*, 2018).

A pressão a que a biomassa é exposta durante a peletização tem impacto significativo na densidade e durabilidade do produto, bem como no consumo de energia do processo. A densidade dos pellets aumenta com o aumento da pressão. (Djatkov *et al.*, 2018). Em temperaturas mais altas, é necessária uma pressão de compressão mais baixa como resultado do amolecimento térmico das fibras. Além disso, o aumento da temperatura implica melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos pellets de biomassa.

O teor de umidade do material de biomassa tem um efeito significativo na densidade dos pellets produzidos. Geralmente, a densidade aumenta com o aumento do teor de umidade até atingir um valor máximo e depois diminui à medida que a umidade

aumenta. Até que o teor ideal de umidade seja alcançado, o teor de água preenche o espaço poroso entre as partículas e contribui para aumentar a massa do pellet, o que por sua vez aumenta sua densidade. Além do valor ideal de teor de umidade, a água extra ocupa o volume do material e aumenta a expansão volumétrica e a resistência à compressão, o que diminui a densidade. Em geral, o teor de umidade ideal para espécies lenhosas está entre 5 e 10% e entre 10 e 20% para biomassas não lenhosas (Djatkov et al., 2018; Lavergne et al., 2021; Thiffault et al., 2019).

O tamanho ideal de partícula depende do processo de densificação. O atrito no canal da prensa de uma peletizadora aumenta à medida que o tamanho das partículas de madeira diminui devido ao aumento da superfície de contato (entre as partículas e a parede do canal). Geralmente, as partículas de produção de pellets têm menos de 5 mm de diâmetro. No entanto, uma quantidade demasiado elevada de finos (partículas com menos de 0,5 mm de diâmetro) na matéria-prima tem um impacto negativo tanto na fricção como na qualidade do pellet (Siyal *et al.*, 2021).

Menor teor de lignina, proteínas e amidos na matriz de lignocelulose pode exigir a adição de ligantes adicionais para melhorar a qualidade dos grânulos produzidos através da criação de fortes ligações entre partículas. Deve-se prestar atenção à seleção do ligante, especialmente ao seu custo e impacto ambiental. Os tipos de aditivos mais comuns para a produção de pellets são os aditivos orgânicos e inorgânicos (Souza *et al.*, 2021).

Os aditivos orgânicos são os principais produtos da biomassa florestal e agrícola, por exemplo, amido de milho, milho ralado, casca de cacau, farinha de milho, farinha de batata e óleo vegetal. Essas pastas são consideradas uma opção razoável devido à sua disponibilidade e baixo custo. Vários pesquisadores usaram diferentes tipos de ligantes orgânicos, como amido, silicatos de sódio, látex, fenol formaldeído, melação, lignina em pó, farinha de colza, farinha de café, pinhas e casca de árvore. De acordo com as normas, quantidades menores ou igual a 2% devem ser consideradas na produção de pellets energéticos (Lavergne *et al.*, 2021).

A produção de pellets propicia maior densidade energética, menor teor de umidade, tamanho e propriedades uniformes e boa resistência mecânica, o que facilita o transporte, armazenamento e manuseio (Bhattacharya *et al.*, 1989). As etapas do processo de peletização podem ser exemplificadas pela Figura 4.

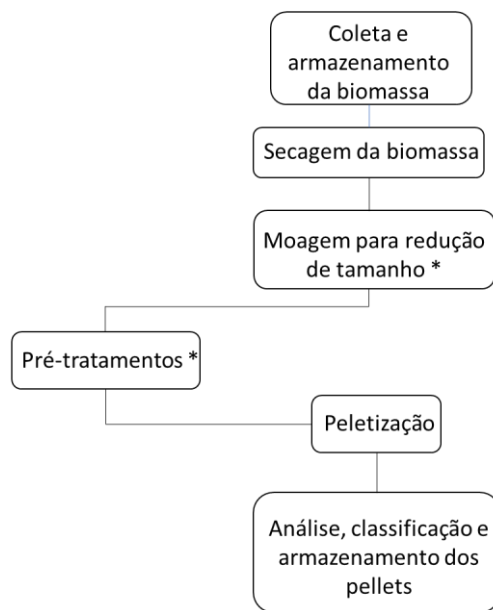


Figura 4 - Representação das etapas do processo de peletização (Pradhavn et al., 2018).

* os pré-tratamentos não são essenciais para o processo de peletização mas auxiliam na melhoria das características energéticas dos pellets produzidos.

A produção de pellets de madeira sofre influência de diversos fatores, aqueles relacionados à madeira: teor de umidade, densidade e distribuição de tamanho das partículas da matéria prima, e outros relacionados aos parâmetros de peletização: tempo de prensagem, temperatura e pressão (Jacinto, 2017). Antes da produção de *pellets*, caso haja a necessidade, a matéria prima é seca ao sol e/ou em estufa, se a biomassa possuir um alto teor de umidade inicial. A uniformização do tamanho das partículas tem influência direta na qualidade do *pellet*, pois interfere na compactação e na porosidade do produto, sendo preferencialmente utilizadas partículas menores que 3,0 mm. O teor de umidade ideal para peletização varia em função da espécie de madeira, oscilando normalmente em torno de 10% (Silva et al., 2017).

As variáveis controláveis durante a produção de *pellets* são o teor de umidade e o tamanho da partícula da biomassa utilizada, e, em relação à máquina, às variáveis controláveis são a temperatura e pressão durante o processo de peletização. Esse tipo de controle permite uma otimização do processo em função do tipo de biomassa gerando assim um maior aproveitamento, além de impactar diretamente na qualidade do produto final (Thiffault et al., 2019).

Algumas das características mais usadas para avaliação da qualidade final dos *pellets* produzidos são: o teor de umidade, as dimensões (diâmetro e comprimento), densidades, durabilidade mecânica e teor de finos, teor de cinzas, poder calorífico, essas características são baseadas em normas, que variam conforme o país e o tipo de biomassa utilizada (Pradhan et al., 2018). As características mecânicas acabam interferindo na qualidade e uso final do *pellet*, por exemplo baixa durabilidade mecânica tende a quebrar durante o transporte gerando finos e com isso o produto final cai em qualidade. Além das características mecânicas há, também, as características físicas, como o teor de umidade final dos pellets.

O teor de umidade final dos pellets depende de características intrínsecas da biomassa, ele pode influenciar positiva ou negativamente a durabilidade mecânica dos *pellets*, além disso o teor de umidade deve ser ajustado em função do tipo de biomassa (florestal, agrícola ou resíduo) e da espécie (Whittaker & Shield, 2017). *Pellets* com um alto teor de umidade possuem um menor poder calorífico útil, além de estarem mais suscetíveis ao ataque fúngico e se tornarem mais frágeis (Carroll & Finnan, 2012). Por interferir em diferentes propriedades, o teor de umidade deve ser bem ajustado para que tenha um bom desempenho no uso final.

A umidade da biomassa, influencia fortemente o processo de peletização e é a variável mais importante para o controle de umidade dos *pellets* (Souza et al., 2012; Rhèn et al., 2005). Segundo (Whittaker & Shield, 2017), o teor de umidade ideal para peletização varia em função da espécie, oscilando entre 6 e 13% para madeiras, 8 a 15% para palhas, podendo chegar a valores entre 20 e 25% para algumas gramíneas. Esses autores destacam que o teor de umidade da matéria-prima pode influenciar positiva ou negativamente a durabilidade mecânica dos pellets, devendo ser ajustado em função do tipo de biomassa.

Em relação às propriedades dos pellets de madeiras amazônicas, o teor de cinzas, por vezes com valores superiores ao estabelecido por normas internacionais, é apontado como fator limitante para aplicações residenciais (Garcia et al., 2018), uma vez que está diretamente relacionado à emissão de partículas durante a queima e à redução do poder calorífico. Em usos industriais, além dessas desvantagens, o teor de cinzas pode implicar em constantes operações de remoção de incrustações oriundas da fusão de cinzas durante a combustão.

A durabilidade mecânica e o teor de finos são igualmente propriedades importantes para obtenção da certificação para exportação de pellets. Essas propriedades indicam a capacidade dos *pellets* de resistir à desintegração física durante o transporte e armazenamento (Tumuluru *et al.* (2011a). Além disso, uma alta resistência mecânica, com consequente redução da fração de finos (poeira e partículas finas), minimiza riscos de explosões nos compartimentos de carga durante o transporte e armazenamento (Garcia *et al.*, 2018).

2.3.2 Cenário mundial e nacional de produção, comercialização de pellets

O estudo conduzido por Garcia *et al.* (2022) apontou que a produção brasileira de pellets aumentou 11 vezes entre 2016 e 2020, totalizando cerca de 820 mil toneladas. Deste total, 56,52% foram produzidos com resíduos *Pinus sp.*, 30,49% com acácia negra e o restante era fabricado a partir de bagaço de cana-de-açúcar e casca de café. De acordo com esses autores, o crescimento acentuado da produção é justificado pelo maior volume de *pellets* de madeira destinados à exportação.

As metas de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis na matriz energética europeia aumentaram consideravelmente a demanda por *pellets* e o Brasil tem sido apontado como um potencial exportador desse biocombustível. Além disso, o cumprimento das metas de redução das emissões de gases de efeito estufa da indústria brasileira exigirá a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, o que poderá impulsionar a demanda por *pellets* de madeira e outras biomassas.

Em 2020, cerca de 88% da produção brasileira de pellets foi destinada ao mercado externo, principalmente Reino Unido e Japão (Garcia *et al.*, 2022). Em 2023, a marca ENplus® certificou mais de 13,6 milhões de toneladas de pellets de madeira (ENplus, 2024).

Neste sentido, é esperado que o Brasil aumente sua participação no mercado de *pellets* nos próximos anos. No entanto, para atingir esse objetivo, a indústria brasileira precisa vencer diversos obstáculos que incluem baixa demanda interna pelo produto, falta de competitividade nas exportações devido ao alto preço da energia elétrica brasileira, baixa escala de produção e logística deficitária (Cupertino, 2017).

Da mesma maneira, (Rendeiro & Nogueira 2008) ressaltam que a viabilidade econômica da produção de *pellets* está relacionada com a disponibilidade, qualidade da

matéria prima, distâncias de transporte, tarifas de energia elétrica e, principalmente, a capacidade instalada da fábrica.

Segundo Gentil (2008) são necessários subsídios governamentais para impulsionar a indústria de pellets no Brasil, como por exemplo: criação de uma legislação que incentive o uso da biomassa em substituição aos combustíveis fósseis; desenvolvimento de normas brasileiras de qualidade de compactados; incentivos fiscais para que as indústrias possam competir com mercados organizados que utilizam combustíveis de origem fóssil, além da criação de laboratórios nacionais e/ou realização de convênios com instituições internacionais de modo a reduzir os custos com análise e certificação dos pellets produzidos.

Os *pellets* in natura apresentam menor custo de produção em comparação aos torrefados. O menor custo de produção de *pellets* de madeira se dá pelo fato de que a sua produção requer apenas um reator, para o processo de secagem, enquanto a produção a partir de madeiras torrefados precisa de um reator para o processo de secagem e outro reator próprio para o processo de torrefação. Os pellets torrefados tem custo maior, pois grande parte dos custos de produção se dão pelo reator de torrefação. Este estudo mostra que a integração da torrefação com outro método tem melhor viabilidade técnica e econômica do que a torrefação autônoma (Cahyanti et al., 2020).

2.3.3 Normas de produção de pellets: nacionais e internacionais

O aumento significativo da demanda por pellets se deve ao fato de que este biocombustível é competitivo em relação às outras formas de energia disponíveis no mercado, outra vantagem é o fato de que os biocombustíveis derivados de madeira não entram em competição com a demanda alimentar mundial o que torna sua utilização vantajosa (Quéno *et al.*, 2019). Apesar de já ser uma tecnologia mundialmente conhecida, a inserção da peletização no Brasil ainda é incipiente. Existem lacunas técnicas, econômicas e regulatórias, principalmente em relação à peletização de espécies florestais amazônicas.

Seja para uso residencial, comercial ou industrial, os *pellets* de biomassa devem atender a diversos critérios de qualidade que impactarão diretamente a qualidade da combustão e as emissões de gases durante a queima. A padronização das propriedades

físicas, mecânicas e energéticas dos pellets é indispensável para a emissão de laudos de qualidade, muitas vezes requeridos pelos próprios consumidores é crucial para viabilizar o mercado internacional do produto (Spanhol *et al.* 2015).

Em 2022, o Brasil publicou duas normas sobre *pellets* a ABNT NBR 17013-1-2022 (ABNT, 2022), que versa sobre os requisitos para a produção e classificação de *pellets* produzidos a partir da madeira de Pinus e a ABNT NBR 17030-2022, que trata da terminologia e métodos de ensaios. Visando unificar a certificação de *pellets* no mercado europeu, foi lançado a norma ISO 17255-2 (ISO, 2014) e ISO 17255-8 (ISO, 2016) estabelecendo padrões de qualidade para pellets e briquetes oriundos de biomassa vegetal para uso residencial e industrial.

A norma ISO 17225-2 estabelece diferentes classes de qualidade para pellets de madeira: A1, A2 e B para usos residencial e comercial (serviços) e I1, I2 e I3 para uso industrial, enquanto a norma ISO 17225-8 estabelece diferentes classes de qualidade para pellets de madeira tratada termicamente: TW1H, TW2H, TW3H, TW1L, TW2L e TW3L.

As classes TW1H, TW2H, TW3H, TW1L, TW2L e TW3L estão relacionadas ao tipo de matéria prima e a severidade do tratamento térmico, madeira não tratada quimicamente.

Os parâmetros considerados nesta classificação são: diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, durabilidade mecânica, teor de finos, poder calorífico inferior, densidade a granel, teores de nitrogênio, enxofre, cloro, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco. Os valores exigidos para cada uma dessas propriedades em função do uso final (residencial, comercial, industrial e tratada termicamente) são mostrados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3. Especificações de qualidade de *pellets* de madeira para usos residencial e comercial, de acordo com a Norma ISO 17225-2 (2014).

Propriedade	Unidade	A1	A2	B
Diâmetro	mm	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 8,0 ±1
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	3,15- 40
Teor de Umidade	%	≤10	≤10	≤10
Teor de Cinzas	%	≤0,7	≤1,2	≤2,0
Durabilidade Mecânica	%	≥97,5	≥97,5	≥96,5
Teor de finos	%	≤1,0	≤1,0	≤1,0
Densidade a Granel	Kg/m ³	≥600	≥600	≥600
Poder calorífico útil	MJ/kg	≥16,5	≥16,5	≥16,5
Nitrogênio	%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Enxofre	%	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05
Cloro	%	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03
Arsênio	mg/kg	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cádmio	mg/kg	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Cromo	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cobre	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Chumbo	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercúrio	mg/kg	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
Níquel	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinco	mg/kg	≤ 100	≤ 100	≤ 100

Tabela 4. Especificações e classes de qualidade de *pellets* de madeira para uso industrial, de acordo com a Norma ISO 17225-2 (2014)

Propriedade	Unidade	I1	I2	I3
Diâmetro	mm	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1, 8,0±1 ou 10±1	6,0 ±1, 8,0±1, 10±1 ou 12±1
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	3,15- 40
Teor de Umidade	%	≤10	≤10	≤10
Teor de Cinzas	%	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Durabilidade	%	97,5≤DU≤99,0	97,0≤DU≤99,0	96,5≤DU≤99,0
Teor de finos	%	≤4,0	≤5,0	≤6,0
Densidade a Granel	Kg/m ³	≥600	≥600	≥600
Poder calorífico útil	MJ/kg	≥16,5	16,5	16,5
Nitrogênio	%	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,6
Enxofre	%	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Cloro	%	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,1
Arsênio	mg/kg	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Cádmio	mg/kg	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cromo	mg/kg	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Cobre	mg/kg	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Chumbo	mg/kg	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Mercúrio	mg/kg	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Zinco	mg/kg	≤ 200	≤ 200	≤ 200

Tabela 5. Especificações e classes de qualidade de *pellets* produzidos a partir de madeira tratada termicamente, de acordo com a Norma ISO 17225-8 (2016).

Propriedade	Unidade	TW1H	TW1L	TW2H	TW2L	TW3H	TW3L
Diâmetro	mm	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 8,0 ±1	6,0 ±1 ou 25,0 ±1	6,0 ±1 ou 25,0 ±1	6,0 ±1 ou 25,0 ±1	6,0 ±1 ou 25,0 ±1
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	3,15- 40 (D06 - D10)	3,15- 40 (D06 - D10)	3,15- 40 (D06 - D10)	3,15- 40(D06 - D10)
				3,15- 50 (D12 - D25)	3,15- 50 (D12 - D25)	3,15- 50 (D12 - D25)	3,15- 50 (D12 - D25)
Teor de Umidade	%	≤08	≤10	≤08	≤10	≤10	≤10
Teor de Cinzas	%	≤1,2	≤1,2	≤3,0	≤3,0	≤5,0	≤5,0
Durabilidade Mecânica	%	≥97,5	≥97,5	≥96,0	≥96,0	≥95,0	≥95,0
Teor de finos	%	≤2,0	≤1,0	≤4,0	≤2,0	≤6,0	≤3,0
Densidade a Granel	Kg/m ³	≥650	≥700	≥650	≥650	≥550	≥550
Poder calorífico útil	MJ/kg	≥21,0	≥2,0	≥21,0	≥21,0	≥21,0	≥21,0
Nitrogênio	%	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,1	≤ 0,1
Enxofre	%	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,1
Cloro	%	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,1

Tabela 5. (Cont.)

Propriedade	Unidade	TW1H	TW1L	TW2H	TW2L	TW3H	TW3L
Arsênio	mg/kg	≤ 1	≤ 1	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Cádmio	mg/kg	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1	≤ 1	≤ 2	≤ 2
Cromo	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 15
Cobre	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Chumbo	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercúrio	mg/kg	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Níquel	mg/kg	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinco	mg/kg	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100

^a base úmida, ^b base seca

2.4 Torrefação

Torrefação é um pré-tratamento térmico, que ocorre na faixa de temperatura entre 200°C e 300°C, com atmosfera totalmente ou parcialmente inerte, que é capaz de alterar significativamente as propriedades físicas e químicas da biomassa (Tumuluru *et al.*, 2011a). A torrefação se difere da pirólise, principalmente porque o objetivo da torrefação é a maximização do rendimento de sólidos. Este processo libera hidrocarbonetos condensáveis, hidrogênio, oxigênio, água, monóxido de carbono e dióxido de carbono (Nhuchhen *et al.*, 2014).

Durante a torrefação há a degradação dos compostos (celulose, hemicelulose e lignina) da biomassa, a partir de dois eventos importantes: a desoxigenação, onde há a migração do oxigênio, e a migração de carbono; este rearranjo influencia as características energéticas e mecânicas do produto final. Assim, estes eventos são importantes para entender como as qualidades da biomassa *in natura* podem ser melhoradas pela torrefação (Chen *et al.*, 2018). Além disso, o rendimento de massa e rendimento energético durante o processo de torrefação depende diretamente da temperatura usada e do tempo de residência do material e o tipo de biomassa e sua umidade inicial (Bergman & Kiel, 2005).

Decomposição, desvolatilização e despolimerização são as três principais reações que ocorrem durante o processo de torrefação que, por sua vez, pode ser dividida em zonas de acordo com a variação de temperatura ao longo do processo. A zona não reativa (50-150 °C), é onde ocorre a secagem da biomassa, com isso há uma redução da porosidade; a zona de secagem reativa (150–200 °C), é onde ocorre a despolimerização da hemicelulose e celulose, começo do amolecimento da lignina e entre 200-250°C, onde ocorrem desvolatilização e carbonização das hemiceluloses, despolimerização e condensação completas da celulose, formação de gases voláteis (gases não condensáveis e condensáveis); na última zona, (250-300°C), a estrutura celular é permanentemente destruída e a biomassa se torna mais friável (Abdulyekeen *et al.*, 2021).

Dentre as vantagens da torrefação, em relação ao uso da biomassa *in natura*, há o aumento do poder calorífico e da densidade energética, isso porque com a degradação dos compostos da biomassa, após a torrefação há mais ligações carbono-carbono (C-C) e carbono-hidrogênio (C-O) que são capazes de liberar mais energia do que ligações oxigênio-hidrogênio (O-H) e ligações oxigênio-carbono (O-C) que por razões anatômicas são mais

baixas, além disso após a biomassa ser torrefada, suas propriedades são mais uniformes, ela se torna mais hidrofóbica e há aumento da friabilidade (Chen et al. 2015; Wang et al., 2017; Grycova et al., 2023). Por essa razão os tratamentos térmicos como a torrefação viabilizam o uso de biomassas que antes poderiam ser descartadas para o uso energético.

2.4.1 Parâmetros da torrefação

A torrefação sofre influência de diferentes parâmetros, sejam eles do processo, como a taxa de aquecimento, a temperatura, a atmosfera (inerte ou não), o tempo de residência a pressão atmosférica, ou parâmetros referentes a biomassa como o teor de umidade, friabilidade, tamanho da partícula, todos eles combinados interferem no tipo de produto gerado após a torrefação (Tumuluru *et al.*, 2011b).

Durante a torrefação, a temperatura e o tempo de residência da biomassa influenciam no tipo de produto gerado. Além disso, o tempo de residência varia conforme o tamanho do reator, o que acaba influenciando nos custos do processo (Strandberg *et al.*, 2015; Wannapeera et al. 2011). Durante a torrefação são gerados três tipos de produtos, um produto sólido, o bio-char, uma mistura de água, lipídios e gases condensáveis e outros gases como hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos (Chen *et al.*, 2018).

Como exemplo da influência do tempo de residência e da temperatura nos produtos gerados pela torrefação, o rendimento do produto sólido diminui com o aumento da temperatura diferente do rendimento dos produtos voláteis, que aumenta (Prins et al., 2006b). Além disso, durante o processo de torrefação, o controle da temperatura no reator influencia diretamente nas reações endotérmicas e exotérmicas que ocorrem na biomassa, por exemplo se houver excesso de liberação de calor durante o processo, as reações térmicas podem se tornar descontroladas o que acaba afetando diretamente na qualidade do produto gerado (Bates & Ghoniem, 2013; Chen *et al.*, 2014).

O aumento do tempo de residência e da temperatura durante a torrefação acabam aumentando a perda de massa da biomassa, devido à degradação dos seus compostos. Por outro lado, a diminuição do rendimento da fração sólida resulta em acréscimo do poder calorífico devido a concentração de carbono e volatilização do oxigênio do material (Li *et al.*, 2015).

Pereira et al (2016) ao analisarem o efeito da temperatura cavacos de eucaliptos torrefados a 200°C e 300°C encontraram aumento no poder calorífico superior de 19,57Mj/kg para 20,93 Mj/kg, respectivamente e diminuição no rendimento gravimétrico de 98,78% para 60,0%. Por essa razão, o controle dessas duas variáveis é de extrema importância para o sucesso da torrefação.

2.4.2 Processo de torrefação

O processo de torrefação da biomassa ocorre em um reator, com controle de temperatura e teor de oxigênio, ambos previamente determinados. Há diversos tipos de reatores e suas classificações, que podem ser de acordo com a tecnologia de torrefação usada, o tipo do reator ou o modo de transferência de calor (Dhungana et al., 2012).

A torrefação é um processo térmico capaz de alterar as propriedades químicas da biomassa através da decomposição de seus compostos. De modo geral, a torrefação tem quatro etapas que estão ilustradas no gráfico a seguir;

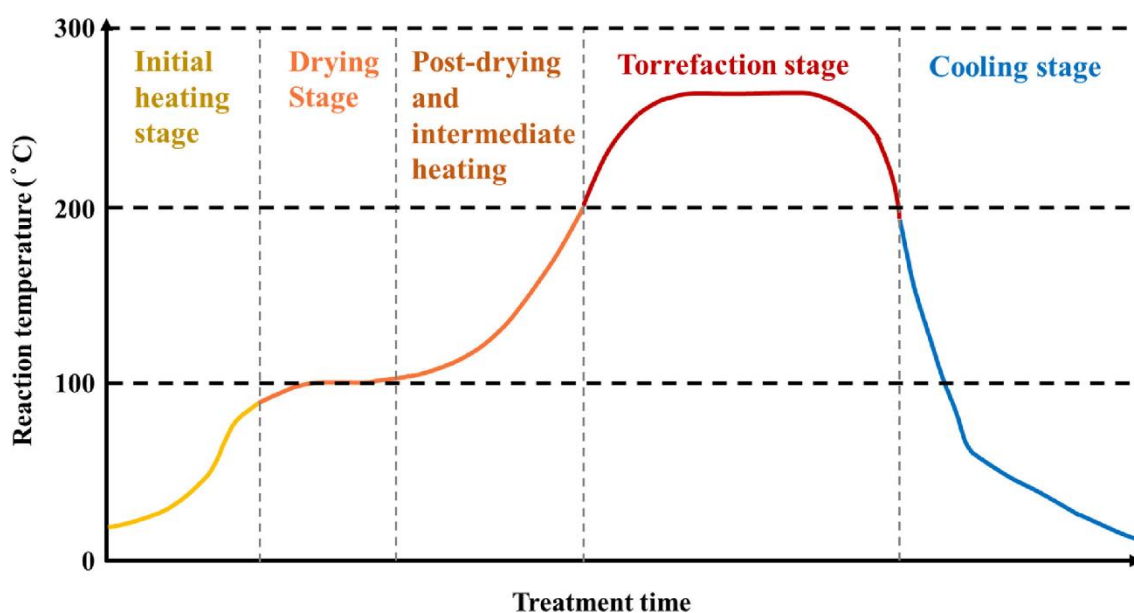


Figura 5 - Etapas do processo de torrefação: (1) aquecimento inicial e secagem; (2) aquecimento intermediário; (3) torrefação e (4) resfriamento (Stelte, et al., 2011b; Junsatien et al., 2012).

1. Aquecimento inicial e secagem: o aquecimento inicial é feito com o aumento gradual da temperatura até a biomassa atingir a secagem propriamente dita, onde ocorre a temperatura por volta de 100 °C. Na secagem, quando o teor de umidade da biomassa está abaixo do

ponto de saturação das fibras, a água livre que está contida na biomassa começa a ser evaporada e a temperatura passa a ser constante, até que a ela perca toda água livre.

2. Aquecimento intermediário: neste ponto toda água livre foi evaporada e a temperatura no reator volta a aumentar até atingir a temperatura de torrefação pré-determinada. Durante essa etapa terminam as reações endotérmicas na biomassa e começam as reações exotérmicas, além da liberação de alguns gases voláteis.

3. Torrefação: a torrefação propriamente dita começa quando a temperatura atinge entre 200 e 300°C. Durante a torrefação, a temperatura é mantida constante por um período de tempo que pode variar de minutos a horas (a depender do tipo de torrefação e tipo de biomassa). É nessa etapa que ocorre a maior perda de massa da biomassa devido à degradação térmica dos seus compostos (hemicelulose, celulose e lignina) e liberação de gases condensáveis.

4. Resfriamento: é a última etapa do processo, a biomassa torrefada é resfriada até a temperatura ambiente, e retirada do reator.

2.4.3 Tipos de torrefação e produtos gerados

A torrefação é um processo térmico que sofre a influência de alguns fatores que impactam tanto o processo quanto às características do produto final. Os principais fatores são temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, tamanho de partículas e tipo de reator (Brojolall & Surroop, 2022). Analisando estes fatores, a torrefação pode ser classificada de acordo com eles. Com relação aos processos, os tipos de torrefação mais comuns são, torrefação seca em atmosfera oxidativa ou não, torrefação úmida (HTC) e torrefação assistida por líquido iônico (Olugbade & Ojo, 2020).

As torrefações do tipo seca e úmida, são as mais comuns, em termos de uso e aplicabilidade do que a torrefação assistida por líquido iônico, e as principais diferenças entre elas são a temperatura, o tempo de residência e atmosfera (Acharya et al., 2015).

Torrefação seca, pirólise leve ou torrefação convencional é o tipo de torrefação mais utilizada comercialmente, ocorre em atmosfera inerte ou parcialmente, com temperatura que varia de 200 °C a 300°C, o tempo de residência é mais longo, podendo chegar até 1 hora e durante o processo são gerados três tipos de produtos: o sólido que contém a maior parte da energia, uma mistura de gases condensáveis, com água e outros componentes orgânicos, e outros gases como hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarbonetos

como o metano (Bach & Skreiberg, 2016; Chen *et al.*, 2018; Chen, 2015). Uma das desvantagens da torrefação seca é o consumo energético com a secagem do material antes da torrefação propriamente dita (Zhang *et al.*, 2019).

A torrefação por líquido iônico é uma alternativa à torrefação seca, esse método tem como objetivo melhorar a taxa de torrefação de biomassa e aprimorar a qualidade do produto sólido, por meio de um processo de pré-tratamento na biomassa visando melhorar sua taxa de reação (Olugbade & Ojo, 2020). Este tipo de torrefação ocorre utilizando água ou soluções diluídas junto da biomassa que entram em um sistema com temperatura que varia de 180 a 260°C, onde a biomassa em contato com o líquido sob esta temperatura e curto período de residência reagem entre si, gerando como produtos, ácido acético, CO₂, água e alguns elementos precipitados (Chen *et al.*, 2015b; He *et al.*, 2018).

A torrefação úmida (ou carbonização hidrotérmica) é uma tecnologia sustentável de pré-tratamento, para transformar biomassa úmida em combustível sólido com propriedades superiores energeticamente a biomassa, e assim evitando a secagem térmica convencional que demanda energia e custo durante a produção (He *et al.*, 2018). Este tipo de torrefação apresenta como vantagem o alto potencial de conversão de vários tipos de biomassa em biocombustíveis sólidos que apresentam propriedades energéticas físicas e químicas melhores do que o uso da biomassa *in natura* (Bach & Skreiberg, 2016).

Com relação a temperatura, a torrefação é classificada como leve, moderada e severa. Torrefação leve ocorre a uma temperatura entre 200° e 230°C, durante esta fase há a perda de umidade e liberação de alguns voláteis de baixo peso molecular (Lu *et al.*, 2021). A torrefação leve é caracterizada pelo início do processo de degradação dos componentes da biomassa, em maior proporção a degradação das hemiceluloses onde os demais componentes, celulose e lignina, permanecem pouco ou nada degradados (Chen *et al.*, 2015).

A torrefação moderada ocorre dentro da faixa de temperaturas entre 235°C e 275°C, e tem como principais características a decomposição da hemicelulose e parte da celulose além da liberação de voláteis, o aumento do poder calorífico e redução do rendimento sólido da biomassa. A torrefação severa ocorre a temperaturas entre 275°C e 300°C, nesta fase as hemiceluloses são completamente degradadas e a celulose foi oxidada em grande parte e por essa razão o rendimento sólido e energético da biomassa tem grande redução e, em contrapartida, há o aumento significativo da densidade energética. Já a lignina, por ser o

componente mais difícil de ser degradado termicamente dentro da faixa de temperatura de torrefação, permanece pouco consumida. (Chen, 2015; Yang *et al.*, 2007).

A diferença entre as temperaturas influencia no tipo e quantidade de produto gerado, além de interferir nas características mecânicas e físicas do material final (Piersa *et al.*, 2022). Por isso é importante a escolha da temperatura adequada para o tipo de biomassa e do produto almejado para o sucesso da torrefação.

Além do tempo de residência e a temperatura, outro parâmetro importante do processo para a torrefação é o tamanho das partículas. Isso porque para garantir o tempo mínimo de permanência do processo, é importante que a taxa de transferência de calor para e dentro da partícula seja rápida, em comparação com a taxa de reação. Isso significa que a temperatura da amostra será essencialmente a mesma que a temperatura do meio circundante (Prins *et al.*, 2006a). Desta forma a depender do tamanho da partícula de biomassa o processo térmico poderá demandar um tempo de residência e ou temperatura maiores.

De modo geral, a torrefação gera três tipos de produtos: sólido, líquido e gases condensáveis. O produto sólido é a biomassa torrefada, que tem como principais características baixa umidade, um material mais hidrofóbico e mais friável além alto poder calorífico, comparado com a biomassa *in natura*; os líquidos e gases condensáveis são compostos, geralmente por água, ácido acético, álcoois, aldeídos, cetonas, furfural e outros composto; já os gases não condensáveis da torrefação geralmente incluem H₂, CO, CH₄ e CO₂ (Sarker *et al.*, 2021; Sarker, 2022; Tran *et al.*, 2013).

Alguns desses produtos podem ser utilizados no processo de torrefação a fim de maximizar a sua eficiência e com isso reduzir os custos, é o caso dos gases condensáveis que são coletados e aquecidos de forma a gerar energia térmica em forma de calor que é fornecida ao sistema o re-alimentando (Niedzwiecki, 2014).

A temperatura, tempo de residência, tamanho da partícula, método de torrefação, são os fatores, anteriormente citados, que de forma conjunta, são responsáveis pelo sucesso ou insucesso da torrefação e conseqüentemente pelos tipos e proporções de produtos gerados.

2.4.4 Torrefação e a decomposição dos compostos da biomassa: celulose, hemicelulose e lignina

A torrefação é um processo endotérmico, onde por meio de reações termoquímicas ocorre a decomposição das hemiceluloses, celulosas e ligninas a medida em que há o aumento da temperatura e do tempo de residência (Barskov *et al.*, 2019).

Durante a torrefação, as hemiceluloses se decompõem entre 200°C e 250°C e a celulose se decompõe entre 240°C e 350°C, enquanto a lignina se decompõe entre 280°C e 500°C e por mais tempo (Wang *et al.*, 2011). De modo geral, o tipo de biomassa, as proporções e tipos de seus componentes, bem como as condições de torrefação definem de forma mais precisa, em quais temperaturas começará o processo de degradação de cada um destes.

O gráfico a seguir apresenta de forma resumida, o processo de degradação de cada componente da biomassa bem como as principais reações que ocorrem e suas respectivas faixas de temperatura.

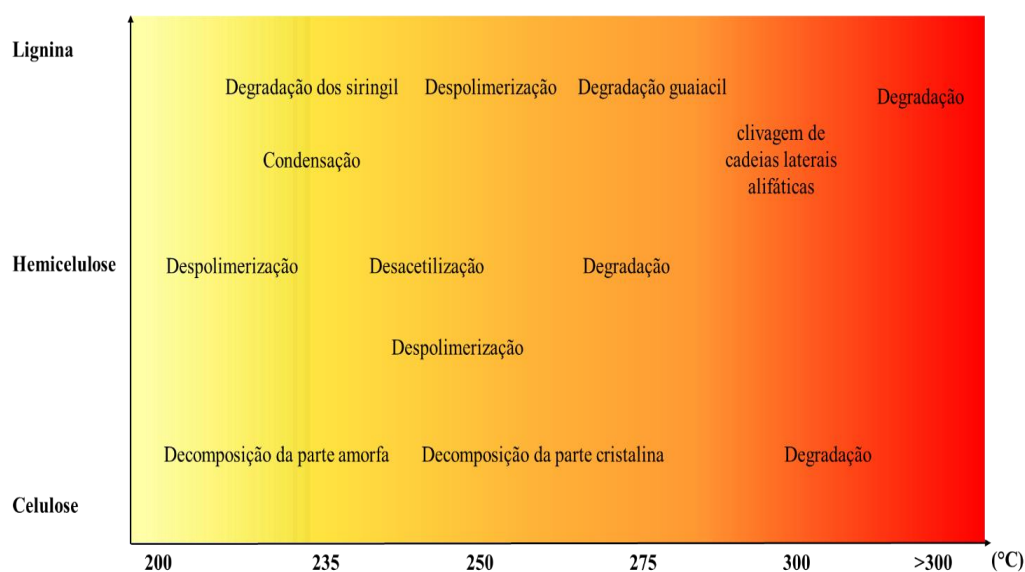


Figura 6 - O gráfico representa os processos que ocorrem durante a degradação das hemiceluloses, celulose e ligninas (Cao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019; González Martínez *et al.*, 2022; Sarker *et al.*, (2021).

Durante a torrefação, o primeiro componente da biomassa a se degradar é a hemicelulose, durante essa fase, é onde ocorre a maior perda de massa devido a degradação de alguns de seus componentes reativos (Arias *et al.*, 2008). A degradação das hemiceluloses

é responsável por tornar o produto mais hidrofóbico, isso porque ocorre a perda de água livre da biomassa e a liberação de alguns gases voláteis durante este processo, alguns destes gases são condensáveis e outros, como o CO₂, não; estes gases acabam formando intermediários com um certo grau de desvolatilização, ao decorrer da torrefação (Lu *et al.*, 2021; Pelaez-Samaniego *et al.*, 2013).

Ao final da degradação das hemiceluloses a maior parte da celulose e da lignina ainda se mantém no material. A estrutura da celulose permanece relativamente intacta durante esta fase, uma vez que são necessárias temperaturas mais elevadas, acima de 300 °C para a decomposição completa (Mahadevan *et al.*, 2016).

Ao final da torrefação, a eficiência do processo de conversão da biomassa se dá pela soma dos produtos líquidos e gasosos que correspondem à perda de massa da biomassa. A eficiência de conversão está relacionada ao tamanho da biomassa *in natura* e às condições de torrefação. À medida que a temperatura de torrefação aumenta, a taxa de conversão da biomassa aumenta e o rendimento do produto sólido diminui, mas o rendimento dos componentes líquidos e gasosos aumenta (Wang *et al.*, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção e caracterização das amostras para estudo

A mistura de resíduos que foi torrificada e, posteriormente, peletizada é oriunda de espécies amazônicas provenientes da Floresta Nacional de Jacundá, localizada em Rondônia no norte do país (Tabela 6) e já foi objeto de estudo preliminar de peletização e caracterização dos pellets em relação à Norma ISO 17225-2, de acordo com Sá *et al.*, (2024). A escolha de uma mistura que engloba muitas espécies se deu por esta representar a situação mais próxima do que é encontrado em campo, fomentando a utilização diversificada de espécies.

O trabalho foi realizado na Área de Energia do Laboratório de Produtos Florestais - LPF do Serviço Florestal Brasileiro – SFB, em Brasília/DF e na Fazenda Água Limpa - FAL pertencente a Universidade de Brasília – UnB.

Tabela 6. Relação das espécies de madeira que compõem a Mistura selecionada para o estudo.

Nome Científico	Nome comum	Família
<i>Peltogyne lecointei</i> Ducke	Roxinho	Fabaceae
<i>Erismia uncinatum</i> Warm.	Libra	Vochysiaceae
<i>Martiodendron elatum</i> (Ducke) Gleason	Tamarindo	Fabaceae
<i>Handroanthus incanus</i> (A.H.Gentry) S.Grose	Ipê roxo	Bignoniaceae
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Cumarú ferro	Fabaceae
<i>Allantoma decandra</i> (Ducke) S.A. Mori et al.	Jequitibá	Lecythidaceae

Primeiramente as misturas foram trituradas em moinho de martelos e classificadas de acordo com a granulometria, inferior ou igual 3,36 mm e posteriormente misturadas na proporção de 16,4% para cada espécie.

3.2 Caracterização do material *in natura*

A mistura de espécies antes da torrefação foi analisada quanto ao teor de umidade (norma ISO 18134-1), teor de cinzas (norma ISO 18122), teor de material volátil (norma ISO 18123) densidade a granel (norma ISO 17828), poder calorífico superior (ISSO 18125) e poder calorífico inferior.

3.2.1 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma ISO 18134-1. O procedimento, em triplicata, consiste em pesar cerca de 300 g do combustível e secá-lo em uma estufa a 103°C até obter o valor de massa constante.

3.2.2 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ISO 18122, com auxílio de um macro analisador termogravimétrico (macro TGA). O princípio da norma consiste em

aquecer uma amostra de biomassa de no mínimo 1g, com granulometria inferior a 1mm, até 250°C, mantê-la durante 1 hora nesta temperatura e posteriormente aquecê-la até 550°C até a massa constante. O ensaio foi realizado em duplicata e o cálculo do teor de cinzas foi feito segundo a Equação 1.

$$CZ(\%) = \frac{(m_{cad.+cz} - m_{cad})}{m_{amos}} \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

CZ (%): é o teor de cinzas em porcentagem, base seca;

$m_{cad.+cz}$: é a massa do cadinho mais as cinzas da amostra, em gramas;

$m_{cad.}$: é a massa do cadinho, em gramas;

$m_{amos.}$: é a massa seca da amostra antes do ensaio, em gramas.

3.2.3 Determinação da densidade a granel

A densidade a granel foi determinada de acordo com a norma ISO 17828 (2015). O princípio da norma consiste na utilização de um recipiente de volume conhecido, o qual deve ser pesado previamente e depois preenchido com a amostra do combustível a ser analisado. Após o preenchimento do recipiente, este é lançado de uma altura de cerca de 10 cm por três vezes para melhor acomodação das partículas. Em seguida, o recipiente foi completado com biomassa até a borda para posterior medição da massa. O ensaio foi realizado em triplicata e a densidade a granel foi determinada segundo a Equação 2.

$$DG = \frac{(m_2 - m_1)}{v} \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

DG: densidade a granel em kg/m³, base úmida;

m_2 : massa do recipiente cheio, em kg;

m_1 : massa do recipiente vazio, em kg;

v : volume do recipiente, em m³.

3.2.4 Determinação dos poderes caloríficos superior e útil.

A determinação do poder calorífico superior (PCS) foi feita de acordo com a norma (ISO 18125), com adaptações do LPF. Antes de cada ensaio, cerca de 1g de amostra com granulometria inferior a 1 mm foi peletizada a frio e seca em estufa a 103°C até massa constante. O PCS do material seco, de massa conhecida, era obtido pela queima do pellet em

um calorímetro isoperibol automático modelo Parr 6400, utilizando-se oxigênio com grau de pureza mínimo de 99,5%. O poder calorífico útil (PCU) foi calculado a partir da Equação 03 (Kolmann, 1951).

$$PCU = \frac{PCS - 600(u + 9h)}{1 + u} \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

PCS: poder calorífico superior e (MJ/kg).

PCU – poder calorífico útil (MJ/kg).

u: teor de umidade em %, base seca.

h: teor de hidrogênio em %, base seca.

3.3 Torrefação

3.3.1 Torrefação das espécies selecionadas para estudo

A mistura foi torrefada à 200 e 275° para representar os extremos das temperaturas de torrefação, conforme Sá et al. (2024). O ensaio foi conduzido em atmosfera parcialmente inerte, 10% de oxigênio, de modo a simular a condição oxidativa a qual a biomassa estaria exposta em plantas de torrefação industriais. A taxa de aquecimento foi de 5°C/min e o tempo de residência de 60 minutos, para a temperatura de 200°C de 30 minutos para a temperatura de 275°C.

Foram colocadas aproximadamente 500g de material *in natura* dentro do reator de torrefação (Figura 7), em seguida este material foi torrefado, resfriado e armazenado. Ao total foram produzidos 3 kg de material torrefado para cada repetição de cada temperatura, totalizando assim 6 kg de material torrefado para cada temperatura.

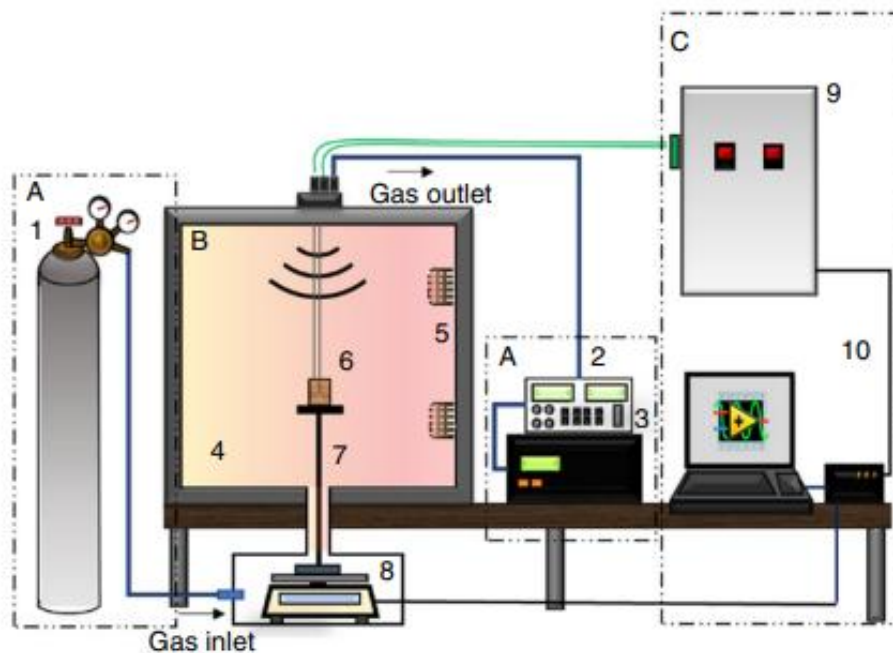


Figura 7 – Esquema representando o reator de torrefação laboratorial utilizado para torrefar a biomassa (Silvera *et al.*, 2020).

O reator, com capacidade para 2kg de biomassa, possui controle do teor de oxigênio e temperatura através de termopares que se localizam dentro do mesmo, fazendo o acompanhamento em tempo real.

3.3.2 *Determinação das propriedades da mistura de espécies submetida à torrefação*

A mistura torrefada foi classificada granulometricamente, em seguida foi caracterizada quanto ao teor de umidade (ISO 18134), teor de cinzas (ISO 18122), teor de material volátil (ISO 18123), densidade a granel (ISO 17228), poder calorífico (ISO 18125) e densidade energética.

3.4 Peletização

3.4.1 *Ensaio de peletização e análise dos pellets*

Os resíduos torreficados e o material *in natura* (Figura 8), com teor de umidade a 12% foram peletizados em uma peletizadora laboratorial, utilizando-se uma matriz plana com aberturas de 6 mm de diâmetro, sendo assim foram gerados os pellets de controle (peletizados com material a 12% de umidade), e os *pellets* do material torreficado a 200°C e 275°C. A velocidade de alimentação foi otimizada em ensaios preliminares e depois fixada

para todos os ensaios de peletização, com o valor entre 10 e 15% da rotação máxima do motor.



Figura 8 – Pellets produzido a partir da mistura de resíduos torrefados de seis espécies de madeiras amazônicas. Da esquerda para direita: *in natura*, 200°C e 275°C.

Os *pellets* produzidos foram analisados quanto ao diâmetro e comprimento (ISO 17829), teor de umidade (ISO 18134), teor de cinzas (ISO 18122), durabilidade mecânica (17831-1), teor de finos (ISO 18846), densidade a granel (ISO 17828), poder calorífico (ISO 18125), densidade energética. Ao final da caracterização, os pellets foram classificados de acordo com as classes de qualidade previstas na norma ISO 17225-8 (para biomassas compactadas após tratamento térmico).

Os teores de umidade e cinzas, poder calorífico inferior, densidade a granel dos pellets foram determinados da mesma forma descrita anteriormente para a mistura de espécies *in natura* e torreficada e a determinação das demais propriedades dos pellets é descrita a seguir.

3.4.2 Determinação do diâmetro e comprimento dos pellets

Para a determinação do diâmetro e do comprimento dos *pellets* foi usada uma amostra de 2,00kg, conforme determina a norma ISO 17829, de onde foi retirada uma amostra representativa de cerca de 50g. Desta amostra de 50g foram retirados aleatoriamente, cerca de 50 *pellets*, cujos diâmetros e comprimentos foram determinados, com auxílio de paquímetro digital.

3.4.3 Determinação da durabilidade mecânica dos pellets

A durabilidade mecânica foi determinada de acordo com a Norma ISO 17831-1. Três amostras de 500g de *pellets* foram obtidas a partir de uma amostra inicial de, no mínimo, 2kg. Antes da realização do ensaio, o material foi peneirado utilizando-se uma peneira com abertura de malha de 3,36mm para eliminação dos finos. Cada uma dessas porções de 500g de *pellets* foi colocada em um friabilômetro (50 rotações por minuto) durante 10 minutos. Em seguida, a amostra foi novamente classificada utilizando-se a peneira com abertura de malha de 3,36mm. A durabilidade mecânica é obtida pela razão entre a massa de pellets retida na peneira após o ensaio e a massa inicial de pellets submetida ao ensaio no friabilômetro, conforme Equação 4.

$$DM = \frac{m_{pf}}{m_{pi}} \times 100 \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

DM: durabilidade mecânica em %, base úmida;

m_{pf} : massa dos pellets após o ensaio, em g;

m_{pi} : massa dos pellets antes do ensaio, em g;

3.4.4 Determinação do teor de finos (partículas < 3,15 mm)

Para determinação do teor de finos, foi utilizada uma amostra de aproximadamente 2,00 kg de *pellets*, conforme estabelece a norma ISO 18846. O princípio da norma consiste no peneiramento manual da amostra de *pellets*, realizando 5-10 movimentos circulares suaves, de modo a separar os finos da amostra de *pellets*, mas ao mesmo tempo evitando a formação de novos finos. Para tal, a norma recomenda a utilização de uma peneira com orifícios circulares de 3,15mm de diâmetro. Devido à indisponibilidade da peneira em questão, ela foi substituída por uma com abertura de malha de 3,36mm e o teor de finos foi determinado conforme Equação 5.

$$F = \frac{m_{fin.}}{m_p} \times 100 \quad \text{Equação 05}$$

Onde:

F: teor de finos em %, base úmida;

$m_{fin.}$: massa de finos, em g;

m_p : massa de pellets, em g.

3.4.5 Determinação da densidade energética

A determinação da densidade energética não é exigida pela norma ISO 17225-8, mas foi calculada por ser uma propriedade que influencia no custo de transporte dos pellets, visto que traduz a quantidade de energia que é transportada por unidade de volume. A densidade energética foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$DE = \frac{DG \times PCU}{1000} \quad \text{Equação 06}$$

Onde:

DE: densidade energética em GJ/m³;

DG: densidade a granel, em kg/m³;

PCU: poder calorífico útil, em MJ/kg.

3.4.6 Determinação do teor de voláteis e cinzas

A determinação do teor de voláteis não é exigida pela Norma ISO 17225-8, mas foi calculada por ser uma propriedade que influencia o desempenho energético e a qualidade dos pellets. O teor de voláteis foi calculado com base na norma ISO 18123 (2015) e o teor de cinzas com base na norma ISO 18122 (2015).

3.4.7 Determinação do carbono fixo

A determinação do carbono fixo não é exigida pela Norma ISO 17225-8, mas foi calculado por ser uma propriedade que influencia na eficiência energética do pellet produzido. O carbono fixo foi calculado de acordo com a Equação 9.

$$CF = 100 - (TU + V + Cz) \quad (9)$$

Onde:

CF: teor de carbono fixo, em %, base úmida;

TU: é o teor de umidade, em %, em base úmida;

V: teor de voláteis, em %, base úmida;

Cz: teor de cinzas, em %, base úmida.

3.4.8 Delineamento do Experimento

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos, representados pelas diferentes temperaturas de torrefação (*in natura*, 200°C e 275°C). As variáveis a serem analisadas são as propriedades dos pellets produzidos (diâmetro, comprimento, umidade, teor de cinzas, durabilidade mecânica, teor de finos, densidade a granel, poder calorífico e densidade energética). O efeito dos tratamentos nas propriedades dos pellets foi verificado com a utilização de Análise de Variância (ANOVA). Foi adotado nível de significância de 5% e, confirmada a rejeição da hipótese nula (valor $P < 0,05$), foi utilizado o teste de Tukey para a diferenciação das médias.

4. RESULTADOS

4.1 Blend e pellets in natura

Os valores médios para as propriedades dos pellets produzidos a partir da mistura de madeiras que tiveram suas variáveis analisadas conforme o padrão mais exigente, da norma ISO 17225-2, de acordo com os dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre valores médios deste trabalho e de outros encontrados na literatura para análise imediata, características físicas, mecânicas e energéticas de pellets *in natura*.

Variáveis	Trabalho atual valores	Outros trabalhos		
		Composição dos pellets	Valores	Referências
Teor de Materiais Voláteis (%)	82,49 (0,31)	Resíduos Finos do desdobro Madeireiro amazônico.	80,7 – 81,1	Moraes, <i>et al.</i> , 2024
Teor de Cinzas (%)	0,21 (21,95)	Pupunha (<i>Bactris gasipaes</i>)	0,18 – 1,19	Nascimento, <i>et al.</i> , 2024
Carbono Fixo (%)	17,30 (1,7)		22,88	
Poder Calorífico (MJ/kg)	20,81 (0,13)	Mistura de resíduos das espécies <i>Dinizia excelsa</i> , <i>Manilkara elata</i> e <i>Eucalyptus</i> spp.	20,39 97,72	Ferreira, <i>et al.</i> , 2023
Durabilidade mecânica (%)	76,69 (1,36)		639,53	
Densidade (kg/m ³)	463,45 (2,12)			
Teor de Finos (%)	14,44 (13,41)	Resíduos lignocelulósicos da cultura da soja, bagaço de cana-de-açúcar e madeira de eucalipto.	3,32	Scatolino, <i>et al.</i> 2018
Densidade Energética (MJ/m ³)	11,40 (0,14)	Mistura de resíduos das espécies <i>Peltogyne lecointei</i> , <i>Martiodendron elatum</i> , <i>Handroanthus incanus</i> , <i>Dipteryx odorata</i> , <i>Allantoma decandra</i> . e <i>Erisma uncinatum</i> .	11,85 – 2,94	Sá et al., 2024
Teor de Umidade (%)	7,81 (9,55)	Serragem de <i>Pinus</i> sp.	5,25	Petricoski, <i>et al.</i> , 2024
Comprimento dos pellets (mm)	10,62 (18,61)	Madeira das espécies <i>Acacia wrightii</i> , <i>Ebenopsis eban</i> e <i>Havardia pallens</i> .	8,80	Artemio <i>et al.</i> 2018

Obs.: valores entre parênteses são coeficientes de variação.

Com relação às variáveis analisadas na Tabela 7, os valores encontrados para as propriedades, comprimento dos pellets (mm), teor de umidade (%), teor de cinzas (%),

densidade a granel (kg/m³), densidade energética (MJ/m³), poder calorífico superior (MJ/Kg), apresentaram valores próximos aos encontrados pelos autores citados.

Diferentes tipos de biomassa, bem como sua granulometria influenciam na qualidade final do pellet e conseqüentemente nas suas propriedades químicas e mecânicas. Para todas as propriedades os valores encontrados na amostra *in natura* estão de acordo com os valores encontrados nos estudos apresentados na Tabela 7.

4.2 Pellets torrefados

4.2.1 Composição química imediata e umidade

Conforme a Tabela 8 e a Figura 8, houve diferença estatística entre os tratamentos *in natura*, 200°C e 275°C para todas as variáveis analisadas na tabela.

Tabela 8 – Médias dos resultados das análises aproximadas e coeficiente de variação (CV %) dos *pellets* torrefados a 200°C e 275°C.

Variáveis	Tratamento			
	In natura	200°C	275°C	
Teor de Voláteis (%)	Média	82,49 a	81,47 b	68,49 c
	CV (%)	0,31	0,05	0,37
Teor de Cinzas (%)	Média	0,21 b	0,19 b	0,74 a
	CV (%)	21,95	16,30	15,31
Carbono Fixo (%)	Média	17,30 c	18,34 b	30,72 a
	CV (%)	1,70	0,52	1,04
Teor de Umidade (%)	Média	7,81 a	4,03 b	6,85 a
	CV (%)	9,55	0,14	8,33

Obs.: médias seguidas da mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

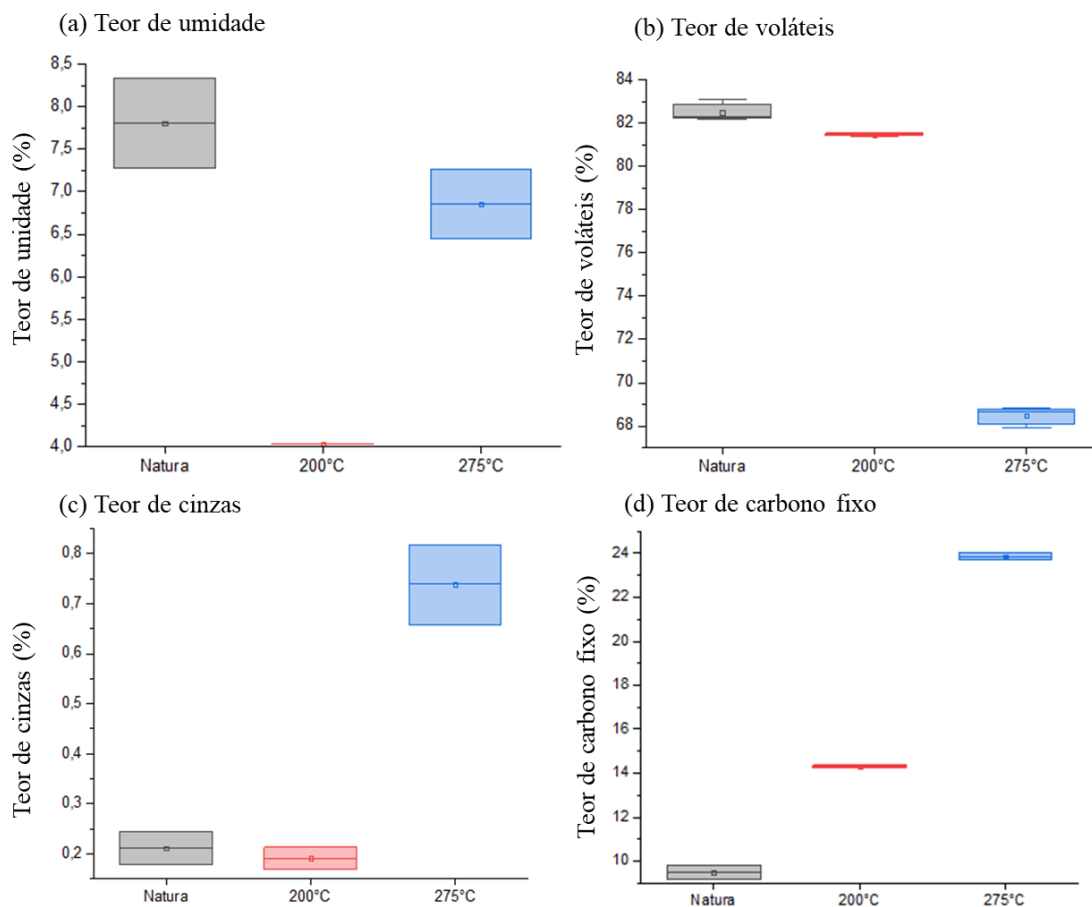


Figura 9 – Da esquerda para direita: médias dos pellets in natura e torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes variáveis: teor de umidade (%), teor de voláteis (%), teor de cinzas (%), e teor de carbono fixo (%).

A diferença entre as médias dos tratamentos reforça a influência da torrefação nas propriedades dos pellets que embora tenham sido analisadas de forma separada, mostram como as propriedades estão correlacionadas entre si e a influência na qualidade final dos pellets produzidos.

Com relação ao teor de umidade final, os *pellets* torrefados apresentaram menores valores em comparação aos *pellets* de *in natura*. O teor de umidade da biomassa torreficada é significativo menor do que o da biomassa *in natura*, pois durante o processo de torrefação ocorre a destruição de grupos hidroxilas por meio de reações de desidratação, evitando a formação de pontes de hidrogênio. (Bergman & Kiel, 2005).

Tal comportamento está relacionado com a hidrofobicidade, que é uma característica observada em pellets torrefados e que se mostrou relacionada com a temperatura de

torrefação. Em um estudo com *pellets* torrefados, (Glód *et al.*, 2023), observou que o *pellet* torrado a 250°C absorveu a maior porcentagem de água, 56,93%, enquanto a amostra torrada a 275°C e 300°C absorveu 35,24% e 23,04% respectivamente.

Os *pellets* produzidos a partir do material torrefado a 200°C apresentaram o menor valor para esta propriedade, em comparação aos *pellets* produzidos a partir do material torrefado a 275°C, 4,04% e 6,86% respectivamente (Tabela 9);

Ao saírem da peletizadora, os *pellets* de material torrefado a 275 °C foram resfriados à temperatura ambiente e armazenados por cerca de 24 horas, até a determinação do seu teor de umidade, enquanto os pellets de material torrefados a 200°C ficaram armazenados por cerca de 12 horas antes da determinação do teor de umidade. Esta diferença no tempo de armazenamento pode ser a explicação para o menor teor de umidade dos pellets de material torrefados a 275°C.

Souza *et al.*, (2012); Rhèn *et al.*, (2005), afirmam que o teor de umidade inicial da biomassa é a variável mais importante para o controle de umidade do produto final e que para materiais lignocelulósicos, altos valores de teor de umidade se correlacionam de forma negativa com o poder calorífico.

Em um estudo com pellets produzidos a partir de pinus torreficado a 270 e 300°C e com teores de umidade 11 e 15%, Larsson & Samuelsson, (2017), observaram que a adição de água ao material torreficado visando melhorar as propriedades dos *pellets* produzidos não se mostrou eficiente, dificultando o fluxo do material pela matriz. Entretanto, alterações nos parâmetros do processo de peletização, como por exemplo, o aumento da temperatura da matriz, se mostraram positivas. Embora todos os tratamentos possuíssem o mesmo teor de umidade final, o material torrefado apresentou uma maior lentidão na produção dos pellets, em comparação ao material *in natura*

Em um estudo com *pellets* de pinus torreficados em um intervalo de 250-300°C com o teor de umidade variando entre 0 a 10% e a temperatura da matriz variando entre 125 e 180°C, combinando estes fatores, Rudolfsson *et al.*, (2015a), constataram que controlar a umidade do material torreficado a altas temperaturas, durante o processo de peletização ainda é algo que requer mais estudos. Uma das soluções propostas por esses autores foi compensar a umidade do material torrefado, ou seja, aumentar o teor de umidade caso a temperatura atingida pela matriz seja maior do que a ideal, para a peletização e vice-versa.

Outra possível solução é a adoção de um método ou instrumento que controle simultaneamente o teor de umidade do material e a temperatura da matriz e estes parâmetros sejam de acordo com a temperatura de torrefação do material peletizado.

O teor de materiais voláteis está associado a quantidade de fumaça produzida durante a combustão, são substâncias voláteis formadas por componentes (excluindo o vapor de água) que evaporam na ausência de ar em altas temperaturas, quanto mais se degrada a biomassa menor será o teor de voláteis (Bates & Ghoniem, 2013; González Martínez et al., 2022; Sutapa & Hidayatullah, 2023).

Com relação ao teor de voláteis, conforme apresentado na Tabela 8 e na Figura 9, o maior valor foi dos *pellets in natura*, seguidos dos pellets torrefados a 200°C e 275°C, respectivamente 82,49%, 81,47% e 68,49% uma possível explicação para os valores próximos entre a temperatura 200°C e *in natura*, se dá ao fato de que esta é uma faixa de temperatura de torrefação leve, onde a degradação da biomassa não é tão severa quanto a 275°C.

Sutapa & Hidayatullah, (2023), em um estudo com *pellets* torrefados de madeira de *Calliandra* sp., observaram valores de teor de voláteis a 250°C por 60 minutos de 78,68%, e a 300°C por 45 e 60 minutos de 61,97% e 61,14%, o que corrobora o comportamento apresentado, no presente estudo, onde houve a diminuição do teor de material volátil com o aumento da temperatura de torrefação.

Peng *et al.* (2015), testando amostras torrificadas de pinus, observou que ao peletizar amostras com a temperatura da matriz a 260°C, a pressão necessária foi próxima a do controle, isso porque o material torrefado estava mais maleável o que facilitou a compactação durante a peletização. Segundo os mesmos autores, o teor de umidade e o conteúdo de voláteis interferem no processo de peletização, pois a altas temperaturas e pressão, o teor de voláteis e de umidade podem aumentar as forças de adesão e coesão dentro da madeira. Estes autores, verificaram que, para o pinus estudado, *in natura*, com um teor de umidade entre 8 e 10%, a temperatura de transição vítrea está entre 60 e 100°C, temperatura esta que foi alcançada pela peletizadora laboratorial utilizada neste estudo.

O teor de cinzas, tem relação com as demais variáveis energéticas apresentadas, pois, os componentes inorgânicos da biomassa também desempenham um papel importante durante o processo de conversão térmica, em virtude das degradações dos componentes

orgânicos, o teor de cinzas (fase inorgânica) aumenta com o aumento da temperatura de torrefação (Zhang & Zhang, 2019).

O que se confirma, nos resultados apresentados, ver Figura 11, onde o maior valor de teor de cinzas, 0,79%, foi dos pellets torrefados a 275°C e o menor valor, 0,19%, foi do pellet torrefado a 200°C.

O baixo teor de carbono fixo da biomassa proporciona uma combustão rápida, pois a biomassa com baixo teor de carbono tende a queimar mais rapidamente (Rupasinghe *et al.*, 2024). Quanto maior o teor de carbono fixo, mais lenta é a queima do material (Francik *et al.*, 2020). Os maiores valores de médias de carbono fixo, foram observados nos *pellets* torrefados a 275°C, 200°C e os pellets *in natura*, com valores de 23,86%, 14,30% e 9,49% respectivamente.

4.2.2 *Análise Energética*

O poder calorífico superior (MJ/Kg) e a densidade energética (Mj/m³) dos *pellets in natura* e torrefados estão presentes na Tabela 9. O maior valor para poder calorífico foi observado nos pellets torrefados a 275°C, seguido pelos pellets torrefados a 200°C e *in natura*, 22,62 MJ/kg, 20,86 MJ/kg e 20,80 MJ/kg, respectivamente.

O poder calorífico aumenta conforme o aumento da temperatura de torrefação, isso porque há maior degradação dos compostos da biomassa e com isso mais moléculas de hidrogênio (H) se tornam disponíveis para novas ligações químicas. O poder calorífico também sofre influência do teor de umidade da biomassa (Lewandowski *et al.*, 2020).

Comparando *pellets* de material *in natura* com pellets torrefados, Alizadeh *et al.*, (2022), observaram um contraste com a relação H/C que teve uma queda suave de 0,05% e a relação O/C diminuiu acentuadamente (de 0,9 para 0,42), com o aumento das temperaturas de torrefação. O mesmo autor, ressalta que o teor de umidade inicial influencia na qualidade energética final dos pellets torrefados.

O teor de carbono e hidrogênio dos *pellets* influenciam positivamente no poder calorífico, enquanto cinzas, oxigênio, teor de umidade e teor de nitrogênio tendem a ter efeitos adversos (Rupasinghe *et al.*, 2024). *Pellets* de mistura de resíduos, em especial, de resíduos agrícolas com madeira se mostra como uma abordagem promissora para a produção

de energia, uma vez que ao misturar diferentes tipos de resíduos, há um rearranjo na porcentagem de algumas variáveis como teor de cinzas, oxigênio, teor de umidade e teor de nitrogênio, amenizando o os efeitos adversos destas variáveis.

Tabela 9 – Médias das variáveis energéticas e coeficiente de variação (CV %) dos pellets torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes propriedades: poder calorífico superior (MJ/Kg) e densidade energética (GJ/kg/m³).

Variáveis		Tratamento		
		In natura	200°C	275°C
Poder Calorífico (MJ/kg)	Média	20,81 b	20,86 b	22,62 a
	CV (%)	0,13	0,13	0,20
Densidade Energética (GJ/m ³)	Média	9,64 b	9,66 b	10,47 a
	CV (%)	0,09	0,05	0,19

Em um estudo avaliando a mistura de resíduos agrícolas e poda de jardim em diferentes faixas de temperaturas de torrefação, entre 200°C e 290°C, observou que para ambos os resíduos, o aumento da temperatura de torrefação diminuiu a higroscopicidade e aumentou o poder calorífico final (Butler et al., 2023). O que também pode ser observado no presente estudo, onde os *pellets* produzidos a partir da biomassa torrefada a 200°C e 275°C apresentaram valores de poder calorífico 0,87% e 1,89%, respectivamente, maiores do que o valor médio encontrado para os pellets *in natura*.

Densidade energética é uma propriedade que relaciona a densidade do material e o poder calorífico, traduzindo, portanto, a quantidade de energia que é produzida por unidade de volume. Há uma relação direta entre densidade a granel e densidade energética, que na prática se traduz na possibilidade de carregamento de mais energia no mesmo espaço do caminhão ou navio cargueiro, diminuindo o custo final do serviço de transporte e tornando esse biocombustível mais competitivo (Garcia et al., 2018).

A maior densidade energética (GJ/m³) permite atingir uma maior capacidade térmica do forno no sistema de alimentação existente e que quando há a maior densidade a granel e maior poder calorífico, resíduos torreficados geram menores custos de transporte e armazenamento.

Os *pellets* produzidos a partir da biomassa torrefada a 275°C apresentam maiores valores de poder calorífico (22,62 MJ/kg) e densidade energética (10,47 MJ/m³), em relação aos demais tratamentos. Neste caso, a propriedade que mais influenciou densidade energética foi o poder calorífico, visto que não houve diferença estatística entre as médias da densidade a granel.

4.2.3 Análise Mecânica

Os resultados das análises estatísticas das variáveis mecânicas dos pellets: durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), comprimento dos pellets (mm) e densidade a granel (kg/m³) produzidos a partir da biomassa *in natura* e torrefada a 200 e 275°C são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 – Teste Tukey de médias dos pellets *in natura* e pellets torrefados a 200°C e 275°C para as seguintes variáveis: durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), comprimento dos pellets (mm) e densidade a granel (kg/m³).

Variáveis		Tratamento		
		In natura	200°C	275°C
Teor de Finos (%)	Média	14,44 a	13,83 a	23,86 b
	CV (%)	13,41	29,49	17,69
Durabilidade mecânica (%)	Média	76,69 a	78,37 a	63,11 b
	CV (%)	1,36	0,77	5,64
Comprimento dos pellets (mm)	Média	10,62 a	10,48 a	8,97 b
	CV (%)	18,61	17,82	29,66
Densidade (kg/m ³)	Média	463,45 a	462,99 a	462,98 a
	CV (%)	2,12	2,82	0,06

Com relação a durabilidade mecânica, (Tabela 10)), não há diferença significativa entre a condição *in natura* e 200°C, no entanto, há uma diminuição significativa de 200 para 275°C. Esta diminuição da durabilidade mecânica dos pellets de biomassa torrefada, a 275°C pode ser explicada pela decomposição de compostos lignocelulósicos da biomassa que são influenciados pela temperatura do processo de torrefação, resultando em um aumento da fragilidade do material. Além da liberação intensa de material volátil, que escapa dos pellets, devido à pressão durante o processo de pelletização, levando ao inchaço, rasgo e afrouxamento das partículas (Dyjakon et al., 2021).

Um dos compostos que são menos degradados durante a torrefação é a lignina que desempenha um papel de aglutinante natural, durante a produção dos pellets, por possuir características termoplásticas ao atingir determinada temperatura. O tipo de lignina e suas proporções, que diferem entre os tipos de biomassa, acabam influenciando a termo plasticidade e a temperatura em que ela ocorre (Whittaker & Shield, 2017), podendo influenciar também a durabilidade dos pellets.

Segundo Oh *et al.*, (2019), *pellets* produzidos a partir de biomassa torrificada acima de 260°C tendem a apresentar baixos valores de durabilidade mecânica devido ao efeito da temperatura na degradação dos componentes da biomassa, mostrando assim que o tratamento com temperaturas inferiores a esta seriam mais interessantes para a melhoria desta propriedade.

O tamanho das partículas afeta a qualidade do *pellet*, aumentando a durabilidade quando produzidos com partículas menores (inferiores a 0,25 mm) e isto se deve a ao maior atrito e resistência ao fluxo de material, resultando em melhor compactação da matéria prima. Desta forma os pellets se tornam mais duros influenciando assim suas características físicas, mecânicas (Mantovani *et al.*, 2023; Tumuluru *et al.*, 2021).

Outra propriedade do *pellet* que pode afetar sua durabilidade mecânica é o seu comprimento. Neste sentido (Gilvari *et al.*, 2021) observaram a diminuição nos valores de durabilidade mecânica de *pellets* com a redução do seu comprimento. A variação excessiva no diâmetro e comprimento dos pellets pode afetar negativamente a durabilidade mecânica destes, formando trincas e aumentando a geração de finos durante o transporte e manuseio (Siqueira *et al.*, 2017).

O comprimento dos pellets (Tabela 10), produzidos a partir da biomassa torrefada a 275°C mostrou valores menores do que os de 200°C e os pellets controle. Uma possível explicação, é o fato de que ao produzir os pellets do material torrefado, houve a troca da matriz devido a um problema técnico na peletizadora, e com isso alterando a altura entre as facas e a matriz influenciando assim no comprimento dos pellets.

Em um estudo (Wang *et al.*, 2020) comparando pellets torrefados a 275°C por 60 minutos com *pellets* não tratados termicamente, observou que as partículas de *pellets* de madeira após torrefação se apresentaram mais redondas, com proporções comprimento/diâmetro muito menores, pois partículas com tais formas e tamanhos podem

passar por uma peneira mais facilmente em comparação com as partículas longas e fibrosas de pellets de madeira moídos não tratados.

Além das condições da biomassa como tamanho das partículas e teor de umidade, fatores inerentes ao maquinário de peletização, como temperatura interna da matriz, tempo de residência do material na matriz, velocidade de alimentação do sistema influenciam no comprimento final do *pellet*. O estudo conduzido por Medeiros et al., (2020) apresentou variação do comprimento médio do *pellet* de 12,87 a 17,85 mm onde o autor relacionou tal resultado ao tempo de residência do material na matriz durante a peletização e ao sistema de alimentação da peletizadora.

O teor de finos é uma propriedade dos *pellets* que está relacionada com a durabilidade mecânica. *Pellets* com uma menor durabilidade mecânica são mais friáveis produzindo assim partículas soltas com uma menor energia que apresentam um risco maior de ignição durante o transporte desses *pellets*, comprometendo assim a qualidade final do produto (Rupasinghe et al., 2024). Como observado na Tabela 10 as propriedades de durabilidade mecânica e teor de finos se mostraram inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a durabilidade mecânica menor a porcentagem de finos produzidos durante o manuseio destes pellets.

De fato, os pellets torrefados a 275°C apresentaram um maior teor de finos comparado com os pellets torrefados a 200°C e com isso, os pellets de 275°C apresentaram menor durabilidade mecânica. Fatores como teor de umidade, tamanho das partículas e baixo teor de lignina, podem dificultar a aglutinação das partículas durante o processo de peletização e com isso maior fragilidade e maior produção de finos (Medeiros et al., 2023).

A torrefação causa degradação dos polímeros da madeira e conseqüentemente das forças de ligação entre as partículas formadas durante o processo de peletização e desta forma, os *pellets* produzidos se tornam mais friáveis, com resistência mecânica reduzida, o que facilita a produção de partículas mais finas (Wang et al., 2020). A produção e quantidade de finos é um dos fatores de qualidade que devem ser considerados na avaliação da qualidade dos *pellets* produzidos, por isso, para evitar a produção de finos, os *pellets* devem suportar os rigores do manuseio e transporte, como forças que causam danos ao pellet e sua conseqüente fragmentação e abrasão durante o manuseio, transporte e armazenamento (Kaliyan et, 2009).

Com relação a densidade aparente dos *pellets* embora não tenha sido apresentada diferença estatística significativa entre os tratamentos, os pellets torrefados apresentaram pequena redução nesta propriedade conforme o aumento da temperatura de torrefação (Tabela 10). Em seu estudo com *pellets* torrefados, (Yu et al., 2017) concluiu que a densidade aparente dos *pellets* torrefados, quando comparados aos *pellets* não torrefados, foi menor devido à liberação de voláteis e à formação resultante de poros intra partícula.

A temperatura e o tempo de residência utilizados durante a torrefação, são fatores que influenciam diretamente nas propriedades dos pellets produzidos a partir de material torreficado. Rudolfsson et al. 2015b em um estudo feito com pinus testando parâmetros da torrefação e peletização, em diferentes combinações, temperatura de torrefação variando entre 291 e 315 °C, com tempos de residência de 6 e 12 minutos, e teores de umidade variando entre 10 e 14%, tamanho das peneiras, entre 4 e 6 mm e o comprimento do tamanho do canal da prensa 25 a 30 mm verificaram que aumentando o tamanho do canal da prensa e o teor de umidade do material, os *pellets* obtidos apresentarem redução do teor de finos, aumento da densidade aparente e durabilidade mecânica, proporcionando assim uma melhora na qualidade dos *pellets* produzidos. Com relação a temperatura e tempo de residência do material torrefado, quanto maior a temperatura e o tempo de residência houve maior pressão durante a peletização.

4.2.4 Classificação dos pellets torrefados: norma ISO 17225-8

Os valores médios para as propriedades dos pellets produzidos a partir da mistura de madeiras torrefadas a 200°C e 275°C tiveram suas variáveis analisadas conforme o padrão mais exigente, TW1H e TW1L, da norma ISO 17225-8, de acordo com os dados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação entre os valores de referência exigidos pela norma ISO 17225-8 nas classes TW1L e TW1H com os valores médios dos pellets torrefados a 200°C e 275°C, para as seguintes propriedades: comprimento dos pellets (mm), teor de umidade (%), teor de cinzas (%), durabilidade mecânica (%), teor de finos (%), densidade a granel (kg/m³ b.u), poder calorífico superior (MJ/Kg b.u).

Propriedade	Unidade	Valores de referência		Médias dos tratamentos	
		TW1L*	TW1H**	200°C	275°C
Comprimento	mm	3,15- 40	3,15- 40	10,48	8,96

Teor de Umidade	% base úmida	≤10	≤08	4,03	6,85
Teor de Cinzas	% base seca	≤1,2	≤1,2	0,9	0,73
Durabilidade Mecânica	% base úmida	≥97,5	≥97,5	78,37	63,11
Teor de finos	% base úmida	≤1,0	≤2,0	13,83	23,86
Densidade a Granel	Kg/m ³ base úmida	≥700	≥650	462,98	462,99
Poder calorífico Líquido	MJ/kg, base úmida	≥21,0	≥21,0	20,86	22,62

* TW1L: tratamento térmico com baixas temperaturas; e **TW1H : tratamento térmico com altas temperaturas

De acordo com a tabela 11, as variáveis dos pellets torrefados a 200°C e 275°C se adequaram aos valores exigidos pela norma ISO 17225-8 nas seguintes propriedades: comprimento, teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico. Para ambas as temperaturas analisadas, os *pellets* de madeira torrefada não se adequaram aos valores exigidos pela norma ISO 17225-8 nas seguintes propriedades: durabilidade mecânica, teor de finos e densidade a granel. Com relação a estas últimas propriedades, os *pellets* de madeira torrefada a 275°C, quando comparados aos *pellets* de madeira torrefada a 200°C, apresentaram as menores médias para durabilidade mecânica e maior para o teor de finos.

5. CONCLUSÃO

A mistura de madeiras torrefadas pode ser peletizada sem a adição de aglutinantes. Entre os tratamentos de torrefação analisados, os pellets produzidos a partir da biomassa torrefada a 200°C apresentaram valores superiores aos encontrados para as seguintes propriedades de variáveis energéticas e mecânicas: comprimento dos pellets, durabilidade mecânica, densidade a granel e densidade energética. Os pellets de 275°C, mostraram um aumento de 8,18% na densidade energética em relação aos pellets torrefados a 200°C.

A utilização de *pellets* como alternativa a combustíveis fósseis na geração de energia já é uma realidade no cenário mundial de matrizes energéticas, e estudos como este, que sugerem o aproveitamento de resíduos, sejam eles florestais, agrícolas ou urbanos como fonte de matéria prima para a geração deste tipo de combustíveis, são de notória relevância para fomentar futuros estudos nesta temática.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULYEKEEN, K.A.; UMAR, A.A.; PATAH, M.F.A.; DAUD, W.M.A.W. **Torrefaction of biomass: Production of enhanced solid biofuel from municipal solid waste and other types of biomass.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 8633: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 17013-1: Pellets requisitos e classificações (madeira de Pinus).** Rio de Janeiro, 2022.

ACHARYA, B.; DUTTA, A.; MINARET, J. **Review on comparative study of dry and wet torrefaction.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015.

AGBOR, V.B.; CICEK, N.; SPARLING, R.; MERLIB, A.; LEVIN, D.B. **Biomass pretreatment: Fundamentals toward application.** National Library of Medicine, 29(6):675-685, 2011. DOI: [10.1016/j.biotechadv.2011.05.005](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005)

AGUIAR, D. R.; LIMA, A. J. N.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Rendimento de madeira serrada para espécies comerciais manejadas na Amazônia central. *Natural Resources*, v.12, n.2, p.86-95, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2022.002.0009>

ALIZADEH, P.; TABIL, L.G.; ADAPA, P.K.; CREE, D.; MUPONDWA, E.; EMADI, B. **Torrefaction and densification of wood sawdust for bioenergy applications.** *Fuels*, v. 3, n. 1, p. 152-175, 2022.

ANTAR, M.; LYU, D.; NAZARI, M.; SHAH, A.; ZHOU, X.; SMITH, K.L. **Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

ARAÚJO, R.O.; RIBEIRO, F.C.P.; SANTOS, V.O.; LIMA, V.M.R.; SANTOS, J.L.; VILAÇA, J.E.S.; CHAAR, J.S.; FALCÃO, N.P.S.; POHLIT, A.M.; DE SOUZA, L.I.C. **Renewable energy from biomass: an overview of the Amazon region.** *BioEnergy Research*, p. 1-16, 2022.

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSE, J.; PLAZA, M.G.; RUBIERA, J.J.P. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

ARPIA, A. A.; CHEN, W.H.; LAM, S.S.; ROUSSET, P.; LUNA, M.D.G. **Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review.** [S. l.]: Elsevier B.V., 2021.

ARTEMIO, C. P. MAGINOT. N.H.; SERAFIN, C.U.; RAHIM, F.P.; GUADALUPE, R.Q.J.; FERMÍN, C.M. **Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species.** *PeerJ*, [s. l.], v. 2018, n. 9, 2018.

AWASTHI, M.K.; SAR, T.; GOWD, K.S.C.; RAJENDRAN, K. A comprehensive review on thermochemical, and biochemical conversion methods of lignocellulosic biomass into valuable end product. **Fuel**, [s. l.], v. 342(1), 2023.

BACH, Q.V.; SKREIBERG, O. **Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2016.

BAJWA, D.S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEINRANI, J.; BAJWA, S.G. **A review of densified solid biomass for energy production**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018a.

BAJWA, D.S.; PETERSON, T.; AHRMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S.G. **A review of densified solid biomass for energy production**. [S. l.]: Elsevier.Ltd, 2018b.

BARSKOV, S; M. ZAPPI, M.; BUCHIREDDY, P.; DUFRECHE, S.; GUILLORY, J.; GANG, D.; HERANDEZ, R.; BAJAPAI, R.; MAUDIER, J.; COOPER, R; SHARP, R. **Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019.

BATES, R.B.; GHONIEM, A.F. Biomass torrefaction: Modeling of reaction thermochemistry. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 134, p. 331–340, 2013.

BATTACHARYAM S.C; SETT, S; SHRESTHA, R.M. **State of the Art for biomass Densification**. Energy Sources. v.11. n.3. pg.161-182. 1989.

BERGMAN, P. CA; KIEL, J. HA. **Torrefaction for biomass upgrading**. In: Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France. sn, 2005. p. 17-21.

BÖRCSÖK, Z.; PÁSZTORY, Z. **The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021.

BRASIL. Lei Nº 11.284, de 2 de março de 2006. **Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; e dá outras providências**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2006.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

BUTLER, James W.; SKRIVAN, William; LOTFI, Samira. **Identification of optimal binders for torrefied biomass pellets**. Energies, v. 16, n. 8, p. 3390, 2023.

BROJOLALL, N.; SURROOP, D. Improving fuel characteristics through torrefaction. **Energy**, [s. l.], v. 246, 2022.

CAHYANTI, M.N.; DODDAPANENI, T.R.K.C.; KIKAS, T. **Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020.

CAI, J.; HE, y.; YU, X.; BANKS, S.W.; YANG, Y.; ZHANG, X.; YU, Y.; LIU, R.; BRIDGWATER, A.V. **Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass**. Renewable and sustainable energy reviews. v.76. pg.309-322. 2017.

CALVO-FLORES, F.G.; DOBADO, J.A. **Lignin as renewable raw material**. *ChemSusChem*, [s. l.], v. 3, n. 11, p. 1227–1235, 2010.

CAO, W.; LI, J.; MARTI-ROSSELLÓ, T.; ZHANG, X. **Experimental study on the ignition characteristics of cellulose, hemicellulose, lignin and their mixtures**. *Journal of the Energy Institute*, [s. l.], v. 92, n. 5, p. 1303–1312, 2018.

CARROLL, J.P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 112, n. 2, p. 151–159, 2012.

CHEN, D.; GAO, A.; CEN, K.; ZHANG, J.; CAO, X.; MA, Z. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v., p. 228–237, 2018.

CHEN, W.H.; KUO, P.C.; LIU, S.H.; WU, W. Thermal characterization of oil palm fiber and eucalyptus in torrefaction. **Energy**, [s. l.], v. 71, p. 40–48, 2014.

CHEN, W.H.; PENG; BI. Torrefaction. *In: Pretreatment of biomass: processes and technologies*. [S. l.]: Elsevier Inc., 2015. p. 173–192.

CHEN, W.H.; WANG, C.W.; ONG, H.C.; LOKE, S.P. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. **Fuel**, [s. l.], v. 258, 2019.

CHEN, W.H.; KUO, P.C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. **Energy**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 2580–2586, 2010.

CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X.T. **A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications**. V.14, p.847-866. Elsevier Ltd, 2015.

CHO, E.J.; TRINH, L.T.P.; SONG, Y.; LEE, Y.G.; BAE, H.J. (2020). Bioconversion of biomass waste into high value chemicals. *Bioresource technology*, 298, 122386.

CUPERTINO, S. A. **Pellets de Madeira como uma Alternativa para a Geração Termelétrica no Brasil**. Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado, junho/2017 (Texto para Discussão nº 235), 2017. Disponível em: www.senado.leg.br/estudos.

DA SILVA, S. B., ARANTES, M. D. C., DE ANDRADE, J. K. B., ANDRADE, C. R., CARNEIRO, A. D. C. O., & DE PAULA PROTÁSIO, T. **Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil**. *Renewable Energy*, 147, 1870-1879. 2020

MEDEIROS, S.H.S.; NASCIMENTO, C.C.; ARAÚJO, R.D.; FREITAS, J.A. **MECANISMO PARA USO SUSTENTÁVEL DA FLORESTA: RESÍDUOS FLORESTAIS**. *Terceira Margem Amazônia*, v. 9, n. 21, p. 131-149, 2023.

DEBONI, T.L.; SIMIONI, F.J.; BRAND, M. A.; LOPES, G.P. Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 135, p. 1291–1302, 2019

DHUNGANA, A.; BASU, P.; DUTTA, A. Effects of Reactor Design on the Torrefaction of Biomass. **Journal of Energy Resources Technology**, [s. l.], v. 134, n. 4, 2012.

DYJAKON, A.; NOSZCZYK, T.; MOSTEK, A. **Mechanical Durability and Grindability of Pellets after Torrefaction Process**. *Energies*, v. 14, n. 20, p. 6772, 2021.

ELBERSEN, W.; LAMMENS, T.M.; ALAKANGAS, E.A.; ANNEVELINK, B.; HARMSEB, P.; ELBERSEN, B. (2017). **Lignocellulosic biomass quality: Matching characteristics with biomass conversion requirements**. In *Modeling and Optimization of Biomass Supply Chains* (pp. 55-78). Academic Press.

ENPLUS. **Pellets de madeira ENplus® devem ultrapassar os 14,5 milhões de toneladas em 2024**. Disponível em: <https://enplus-pellets.eu/language/pt/2024/06/06/pellets-de-madeira-enplus-devem-ultrapassar-os-145-milhoes-de-toneladas-em-2024/> . 2024

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Décima quarta edição da Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis, com foco no ano de 2022**. Ministério de Minas e Energia. <http://www.epe.gov.br>. 2023

FIGUEROA, M.J.M; MORAES de, D.P. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. *Ambiente Construído*. Porto Alegre. v.9. n.4. p.157-174. 2009.

FERREIRA, L.R.A.; OTTO, R.B.; SILVA, F.P.; DE SOUZA, S.N.M.; DE SOUZA, S.S.; ANDO JUNIOR, O.H. **Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil**. [*s. l.*]: Elsevier Ltd, 2018.

FERREIRA, G., BRITO, T.M., da SILVA, J.G.M. *et al.* **Wood Waste Pellets as an Alternative for Energy Generation in the Amazon Region**. *Bioenerg. Res.* **16**, 472–483. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10446-w>. 2023.

FRANCIK, S.; KNAPCZVK, A.; WÓCIK, A.; SLIPEK, Z. (2020). **Optimisation Methods in Renewable Energy Sources Systems—Current Research Trends**. 10.1007/978-3-030-13888-2_81.

GARCIA, P.D; CARASCHI, C.J; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira**. *Revista da Madeira*. n.2. v.135. p.18-54. São Paulo. 2013.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIM, G.; PRATES, G.A.; PROTÁSIO, T.P. **Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225**. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, [*s. l.*], v. 9, n. 1, p. 45–53, 2018.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C., PROTÁSIO, T.P.; VIANA, R.S.; SCAGTOLIONO, M.V. **Produção brasileira de pellets de biomassa agroflorestal**. 10.17224/EnergAgric.2022v37n1p30-38

GENTIL, L.V.B. (2008). **Tecnologia e Economia do Brique de Madeira**. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Publicação EFL TD – 009/2008. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília. DF, 195 p

GELLERSTEDT, G.; HENRIKSSON, G. **Lignins: Major Sources, Structure and Properties**. Chapter 9, p. 201 – 224. 2008..

GILVARI, H.; BATTUM, G.H.H.; DIJK, S.A.V.; JONG, W. **Large-scale transportation and storage of wood pellets: Investigation of the change in physical properties**. *Particuology*, [*s. l.*], v. 57, p. 146–156, 2021.

GONZÁLEZ MARTÍNEZ, M.; COUCE, A.A.; DUPONT, C.; PERES, D.S.; THIÉRY, S.; MEYER, X.M.; GOURDON, C. Torrefaction of cellulose, hemicelluloses and lignin extracted from woody and agricultural biomass in TGA-GC/MS: Linking production profiles of volatile species to biomass type and macromolecular composition. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 176, 2022.

GOUVEIA, L.; PASSARINHO, P.C. Biomass conversion technologies: Biological/biochemical conversion of biomass. *In*: LECTURE NOTES IN ENERGY. [S. l.]: Springer Verlag, 2017. v. 57, p. 99–111.

GOYAL, H. B.; SEAL, D.; SAXENA, R.C. **Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review**. [S. l.: s. n.], 2008.

GLÓD, Krzysztof et al. Torrefaction as a way to increase the waste energy potential. **Energy**, v. 285, p. 128606, 2023.

GRYCOVA, B.; KLEMENCOVA, K.; JEZERSKA, L.; PAVEL, M.Z. Effect of torrefaction on pellets quality parameters. *Biomass Conv. Bioref.* v.3, p. 13235-13243. 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/s12299-021-02164-8>

HASSAN, S.S.; WILLIAMS, G.A.; JAISWAL, A.K. **Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

HE, C.; TANG, C.; LI, C.; YUAN, J.; TRAN, K.Q.; BACH, Q.V.; QIU, R.; YANG, Y. **Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production: A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 17225-2**. Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 2: Graded wood péletes. Genebra. 2014.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 17225-8**. Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels. Genebra. 2016.

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 17828 (2015)** Solid biofuels — Determination of bulk density

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18122 (2015)** Solid biofuels — Determination of ash content

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18123 (2015)** Solid biofuels — Determination of the content of volatile matter

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18134-1 (2015)** Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method — Part 1: Total moisture — Reference method

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18123 (2015)** Determination of the content of volatile matter

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 17829 (2015)** Solid biofuels — specifies the methods for the determination of diameter and length of pellets.

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 17831-1 (2015)** Solid biofuels — defines a determination method for testing the mechanical durability of pellets.

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18846 (2016)** Solid biofuels — specifies a method for determining the amount of material passing through a sieve with a 3,15 mm diameter round hole.

ISO – International Organization for Standardization - **ISO 18125 (2017)** Solid biofuels — specifies a method for the determination of the gross calorific value of a solid biofuel at constant volume and at the reference temperature 25 °C in a bomb calorimeter calibrated by combustion of certified benzoic acid.

IM, J.; LEE, S.; JO, I. Structural characteristics and thermal properties of regenerated cellulose, hemicellulose and lignin after being dissolved in ionic liquids. **Journal of industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 107, p. 365–375, 2022.

JACINTO, C.R. **Produção de pellets para energia utilizando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade de Estado de Santa Catarina, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal. p.1-80. Lages, SC. 2017.

JUNSATIEN, W.; SOPONPONGPIPAT, N.; PHETSONG, S. **Torrefaction reactors**. Journal of Science and Technology Mahasarakham University, v. 32, n. 1, p. 84-91, 2013.

KATAHIRA, R.; ELDER, T.J.; BECKHAM, G.T. Chapter 1: A Brief Introduction to Lignin Structure. **RSC Energy and Environment Series**, [s. l.], v. 2018-Janua, n. 19, p. 1–20, 2018.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. **Densification characteristics of corn stover and switchgrass**. Transactions of the ASABE, v. 52, n. 3, p. 907-920, 2009.

KOLMANN, F. Technologie des holzes und der hozwekstoffe. Erster band. Springer-Verlag/Berlin. Gottingen Heidelberg, 1050p. 1951.

KLOCK, U. Química da Madeira: tecnologia de celulose e papel. 2013a. Site: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2013_Umberto_Klock_QuimicaMadeira.pdf

KLOCK, U. ANDRADE, A.S. **Química da madeira (4ª. Edição)**. Curitiba: UFPR. 2013b, 85p.<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/Quimica%20da%20Madeira%202013.pdf>

LARSSON, Sylvia H.; SAMUELSSON, Robert. Prediction of ISO 17831-1: 2015 mechanical biofuel pellet durability from single pellet characterization. **Fuel processing technology**, v. 163, p. 8-15, 2017.

LAVERGNE, S.; LARSSON, S.H.; PEREZ, D.D.A.S.; MARCHAND, M.; CAMPARGUE, M.; DUPONT, C. **Effect of process parameters and biomass composition on flat-die pellet production from underexploited forest and agricultural biomass**. Fuel 302. 2021.

LEE, J. S.; SOKHANSANJ, S.; LAU, A.; LIM, J.C. *et al.* Physical properties of wood pellets exposed to liquid water. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 142, 2020.

LEWANDOWSKI, W.M.; RYMS, M.; KOSAKOWSKI, W. **Thermal biomass conversion: A review**. *Processes*, v. 8, n. 5, p. 516, 2020.

LI, M.F.; LI, X.; BIAN, J.; CHEN, C.Z. Effect of temperature and holding time on bamboo torrefaction. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 83, p. 366–372, 2015.

LI, P.; SAKURAGI, K.; MAKINO, H. **Extraction techniques in sustainable biofuel production: A concise review**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2019.

LIN, CHERNG-YUAN; LU, CHERIE. **Development perspectives of promising lignocellulose feedstocks for production of advanced generation biofuels: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 136, p. 110445, 2021.

LIMA, M D R.; PATRÍCIO, E.P.S.; BARROS JUNIOR, U.O.; SILVA, R.C.C.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; HEIN, P.R.G.; PROTÁSIO, T. P. **Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy**. *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2020.08.07. 2021.

LIN, C.Y.; LU, C. **Development perspectives of promising lignocellulose feedstocks for production of advanced generation biofuels: A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

LU, H.; AREEPRASERT, C.; DING, L. **Integration of Biomass Torrefaction and Gasification based on Biomass Classification: A Review**. [S. l.]: John Wiley and Sons Inc, 2021.

MAHADEVAN, R.; ADHIKARI, S.; SHAKYA, R.; WANG, K.; DAYTON, D.C.; LI, M.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A.J. Effect of torrefaction temperature on lignin macromolecule and product distribution from HZSM-5 catalytic pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 122, p. 95–105, 2016.

MEDEIROS, S.H.S.; NASCIMENTO, C.C.; ARAÚJO, R.D.; FREITAS, J.A. **Mecanismo para uso sustentável da floresta: resíduos florestais**. *Terceira Margem Amazônia*. v. 9, n. 21, p. 131-149, 2023.

MELLEROWICZ, E. J.; SUNDBERG, B. Wood cell walls: biosynthesis, developmental dynamics and their implications for wood properties. **Current Opinion in Plant Biology**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 293–300, 2008.

MESQUITA, J.G.; ANDRADE, J.K.B.; MUSTEFAGA, E.C.; RIBASKI, N.G.; PEREIRA, A.K.S.; LIMA, M.D.R.; PROTÁSIO, T.P.; HILLIG, E. **Wood waste pellets from sustainable forest management in the Amazon as an energy source**. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 6, p. e4769-e4769, 2024.

MANTOVANI, E., SIMEONE, M., de OLIVEIRA, A. C., & PARRELLA, R. D. C. **Efeito do tamanho de partícula e modo de prensagem de sorgo biomassa para a produção de energia térmica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2023.

MORAIS, W.W.C.; BRITO, J.O.; ANDRADE, C.R.; DIAS JUNIOR, A; MORAIS, J.B.F. **Qualidade de resíduos madeireiros estocados em serrarias na Amazônia para fins energéticos**. *Advances in Forestry Science*, v. 11, n. 1, p. 2176-2182, 2024.

NASCIMENTO, C.S.; VAREJÃO, M.J.C.; ARAÚJO, R.D.; OLIVEIRA, M.C.R.; CRUZ, I.A.; ABREU, R.L.S. **Chemical characterization of lignocellulolytic materials from the Amazon Rainforest to indicate sustainable use.** In: TÓPICOS ESPECIAIS EM ENGENHARIA FLORESTAL-VOLUME 1. Editora Científica Digital. p. 66-78. 2024.

NAVI, P.; DICK, S. (2011). *Thermo-Hydro-Mechanical Wood Processing* (1st ed.). EPFL Press. <https://doi.org/10.1201/b10143>

NHUCHHEN, D.R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, [s. l.], p. 1–56, 2014.

NIEDZWIECKI, I.; MOSCICKI, K.; PWXZAREL, P.; WNUKOWSKI, M. Commodization of biomass: dry torrefaction and palletization – a review. *Journal of Power Technologies*, 94, 223-249. 2014.

NIELSEN, N.P.K.; HOLM, J.K.; FELBY, C. **The effect of LignoBoost kraft lignin addition on the pelleting properties of pine sawdust.** Proceedings of the World Bioenergy Conference and Exhibition on Biomass for Energy. International Energy Agency. pp.120-124. 2008

OH, S.W.; PARK, D.H.; LEE, S.M.; AHN, B.J.; HEE, A.S.; IN, Y. Effect of Torrefaction Temperature on Lignin Distribution of *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. Cubes and the Impact of Binder on Durability of Pellets Fabricated with the Torrefied Cubes. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, [s. l.], v. 38, n. 5, 2019.

OLUGBADE, T.O.; OJO, O.T. **Biomass Torrefaction for the Production of High-Grade Solid Biofuels: a Review.** [S. l.]: Springer, 2020.

ONG, H.C.; CHEN, W.; SINGH, Y.; GAN, Y.Y. **A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020.

OSMAN, A.; MEHTA, N.; ELGARAHY, A.; AL-HINAI, A. **Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review.** [S. l.]: Springer International Publishing, 2021-. ISSN 16103661.v. 19

OSMAN, A.I; MEHTA, N.; ELGARAHY, A.M.; AL-HINAI, A. **Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review.** [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021.

OLSSON, A. M.; SALMÉN, L. **Viscoelasticity of in situ lignin as affected by structure: Softwood vs. hardwood.** 1992. 133-143.

PASANGULAPATI, V.; RAMACHANDRIYA, K.D.; KUMAR, A.; WILKINS, M.R.; JONES, C.L.; HUHNKE, R.L. Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 114, p. 663–669, 2012.

PELAEZ-SAMANIEGO, M.R.; YADAMA, V.; LOWELL, E.; ESPINOZA-HERRERA, R. **A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties.** [S. l.]: Springer Verlag, 2013.

PELAEZ-SAMANIEGO, M.R.; YADAMA, V.; GARCIA-PEREZ, M. LOWELL, E.C. Effect of temperature during wood torrefaction on the formation of lignin liquid intermediates. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 109, p. 222–233, 2014.

PENG, J.; WANG, J.; BI, X.T.; LIM, C.J.; SOKHANSANJ, S.; PENG, H.; JIA, D. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 129, p. 168–173, 2015.

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

PETRICOSKI, Silvia Maccari; DE MENDONÇA COSTA, Mônica Sarolli Silva; DE OLIVEIRA, Adriana Ferla. **Análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos para produção de pellets a partir de biomassa residual**. *Revista Cultivando o Saber*. v. 17, p. 82-97. 2024.

PIERSA, P.; UNYAY, H.; SZUFA, S.; LEWANDOWSKA, W.; MODRZEWSKI, R.; SLEZAK, R. **An Extensive Review An Extensive Review and Comparison of Modern Biomass Torrefaction Reactors vs. Biomass Pyrolysis—Part 1**. [S. l.]: MDPI, 2022.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S.M.; ARORA, A. **Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2018.

PRINS, Mark J.; PTASINSKI, Krzysztof J.; JANSSEN, Frans J.J.G. Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 28–34, 2006a.

PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 35–40, 2006b.

QASEEM, M. F.; SHAHEEN, H.; WU, A.M. **Cell wall hemicellulose for sustainable industrial utilization**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

QUÉNO, L.R.M., SOUZA, Á.N.; COSTA, A.F.D.; VALE, A.T.; JOAQUIM, M.S. (2019). **Technical aspects of wood pellet production**. *Ciência Florestal*, 29, 1478-1489.

RAO, J.; LV, Z. CHEN, G.; PENG, F. **Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2023.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. **Combustão e gaseificação da biomassa sólida soluções energéticas para a Amazônia**. Ministério de Energia. Brasília. Ed.1. pg.

RHÈN, C. GREF, R. SJOSTROM, M. WASTERLUND, I. **Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets**. *Fuel Processing Technology*. v.87. p.11-16. 2005

RUDOLFSSON, M.; STELTE, W.; LESTANDER, T.A. Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel pellet production - A parametric study. **Applied Energy**, [s. l.], v. 140, p. 378–384, 2015a.

RUDOLFSSON, M.; STELTE, W.; LESTANDER, T.A. Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel pellet production - A parametric study. **Applied Energy**, [s. l.], v. 140, p. 378–384, 2015b.

RUPASINGHE, R.L.; PERERA, P.; MANDARA, R.; AMARASEKERA, H.; VLOSKY, R.. **Insights into Properties of Biomass Energy Pellets Made from Mixtures of Woody and Non-Woody Biomass: A Meta-Analysis**. *Energies*, v. 17, n. 1, p. 54, 2024.

SA, I. A.; MACEDO, L.A. ; CHAVES, B. S. ; GALVAO, L. G. O. ; VALE, A.T. ; GHESTI, G. F. ; PROTASIO, T. P. ; ROGRIGUES, J. S. ; LAMAS, G. C. ; SILVEIRA, E. A. . **Evaluating the quality of wood waste pellets and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon**. *RENEWABLE ENERGY JCR*, v. 231, p. 1-14, 2024.

SCATOLINO, M.V., NETO, L.F.C., PROTÁSIO, T.P. *et al.* **Options for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combinations Between Lignocellulosic Biomasses**. *Waste Biomass Valor.* 9, 479–489 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0010-2>

SARAVANAN, A.; KUMAR, P.S.; JEEVANANTHAM, S.; KARISHMA, S.; DAI-VIET, N.V. **Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass**. *Bioresource Technology*, v.344, Elsevier Ltd, 2022.

SARKER, T.R; NANDA, S.; DALAI, A.K.; MEDA, V. A Review of Torrefaction Technology for Upgrading Lignocellulosic Biomass to Solid Biofuels. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2>.

SARKER, T.R.; AZARGOHUR, R.; SOTBBS, J.; KARUNADARAN, C.; MEDA, V.; DALAI, A.K. Complementary effects of torrefaction and pelletization for the production of fuel pellets from agricultural residues: a comparative study. *Elsevier*, v. 181. 2022. Disponível em <https://doi.org/10.106/j.indcrop.2022.114740>.

SHARMA, H.K.; XU, C.; QIN, W. **Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview**. [S. l.]: Springer Netherlands, 2019.

SILVA, C.M.S.; VITAL, B.R.; CARNEIRO, A.C.O.; OLIVEIRA, A.C.; ARAÚJO, S.O.; MAGALÃES, M.A. **Energy properties of wood particles torrefied at different temperatures**. *Revista Árvore*, v. 41, n. 4, p. e410404, 2017.

SILVA, E.F.F.; BRASIL, A.C.D.M.; BLANCO, C.J.C. **Wood Production and Its Correlation with Socioeconomic and Environmental Indicators in the Amazon Region**. *Sustainability* 2023, 15, 11932. <https://doi.org/10.3390/su151511932>

SILVEIRA, E. A., GALVÃO, L. G. O., SÁ, I. A., SILVA, B. F., MACEDO, L., ROUSSET, P., & CALDEIRA-PIRES, A. (2019). **Effect of torrefaction on thermal behavior and fuel properties of Eucalyptus grandis macro-particulates**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 3645-3652.

SIVABALAN, K.; HASSAN, S.; Ya, H.; PASUPULETI, J. (2021, March). **A review on the characteristic of biomass and classification of bioenergy through direct combustion and gasification as an alternative power supply**. In *Journal of physics: conference series* (Vol. 1831, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.

SIQUEIRA, H.F. **Efeito de aditivos na qualidade de pellets de madeira para uso energético.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

SOUZA, M.M.; SILVA, A.D.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, C.R. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de Pinus taeda.** Revista Floresta. Curitiba, PR. v.42. n.2. p.325-334. 2012.

SPANHOL, A. NONES, D.L. KUMABE, F.J.B. BRAND, M.A. **Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia.** Revista Floresta. V.45. n.4. pg.833-844. 2015.

STELTE, W.; HOLM, J.K.; SANADI, A.; BARSBERG, S. **Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions.** Fuel, [s. l.], v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011a.

STELTE, W.; CRAIG, C.; HOLM, J.K. **Pelletizing properties of torrefied spruce.** Biomass and Bioenergy. v.35. n.11. p.4690-4698. 2011b.

STELTE, W.; CLEMONS, G.; HOLM, J.K.; AHRENFELDT, J. **Fuel Pellets from Wheat Straw: The Effect of Lignin Glass Transition and Surface Waxes on Pelletizing Properties.** Bioenergy Res. v.5. p.450-458. 2012.

STELTE, Wolfgang; SANADI, A. R., SHANG, L., HOLM, J. K., AHRENFELDT, J., & HENRIKSEN, U. B.*et al.* **Recent Developments in Biomass Pelletization – a review.** BioResources, v. 7, n. 3, p. 4451-4490, 2012.

STRANDBERG, M.; OLOFSSON, I.; POMMER, L. **Effects of temperature and residence time on continuous torrefaction of spruce wood.** Fuel Processing Technology, [s. l.], v. 134, p. 387–398, 2015.

STRAGLIOTTO, M.C.; PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C. **Indústrias madeireiras e rendimento em madeira serrada na Amazônia Brasileira.** Engenharia florestal: desafios, limites e potencialidade, p. 499-518, 2020.

SU, Y.; ZHANG, S.; XIONG, Y.; ZHANG, H. Inhibition mechanism of calcium hydroxide on melting and agglomeration behaviors of lignin under torrefaction temperature range. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 235, 2022

SUTAPA, J. P. G., & HIDYATULLAH, A. H. **Torrefaction for improving quality of pellets derived from calliandra wood.** Journal of the Korean Wood Science and Technology, 51(5), 381-391. 2023

SIYAL, A. A., MAO, X., LIU, Y., RAN, C., FU, J., KANG, Q., ... & LIU, G. **Torrefaction subsequent to pelletization: Characterization and analysis of furfural residue and sawdust pellets.** Waste Management, 113, 210-224. 2020.

SIYAL, A. A., LIU, Y., MAO, X., ALI, B., HUSSAIN, S., DAI, J., ... & Liu, G. **Characterization and quality analysis of wood pellets: effect of pelletization and torrefaction process variables on quality of pellets.** Biomass Conversion and Biorefinery, 1-17. 2021.

TAO, G.; LESTANDER, T.A.; GELADI, P.; XIONG, S. **Biomass properties in association with plant species and assortments I: A synthesis based on literature data of energy properties.** [S. l.: s. n.], 2012.

THAKUR, V. K. **Green composites from natural resources.** 1^a Edition. CRC Press, 419p. 2013. <http://doi.org/10.12016076>.

THIFFAULT, E.; BARRETTE, J.; BLANCHET, P. NGUYEN, Q.N.; ADJALLE, K. Optimizing quality of wood pellets made of hardwood processing residues. **Forests**, [s. l.], v. 10, n. 7, 2019.

TRAN, K.Q.; LUO, X.; SEISENBAEVA, G.; JIRJIS, R. Stump torrefaction for bioenergy application. **Applied Energy**, [s. l.], v. 112, p. 539–546, 2013.

TU, W.C.; HALLETT, J.P. **Recent advances in the pretreatment of lignocellulosic biomass.** [S. l.]: Elsevier B.V., 2019.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; HESS, J.R.; KENNEY, K. **A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application.** *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 5:683-707. 2011a.

TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; WRIGHT, C.T.; BOARDMAN, R.D.; YANCEY, N.A.. **A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods.** *ASABE Annual International Meeting Sponsored, 2011b*

TUMULURU, J. S., GHIASI, B., SOELBERG, N. R., & SOKANSANJ, S. **Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts.** *Frontiers in Energy Research.* 9, 728140. 2021

UZUN, H.; YILDIZ, Z.; GOLDFARB, J.L.; CEYLAN, S. Improved prediction of higher heating value of biomass using an artificial neural network model based on proximate analysis. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 234, p. 122–130, 2017.

VALDIONES, A.P. et al. A Evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020 e as oportunidades para o seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década / Ana Paula Valdiones... [et al]. - Belém, PA: Imazon: Imaflora: ICV: IDESAM, 2022. 50 p. : il. color. ISBN 978-65-89617-12-9

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. *The handbook of biomass combustion and co-firing.* 1st ed. London Sterling, pp.442.2008.

VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.; VASSILEVA, C.; MORGAN, T. **An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass.** [S. l.: s. n.], 2012.

VASSILEV, S.V.; VASSILEVA, C.G.; VASSILEV, V. S. **Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview.** *Fuel*, v. 158, p. 330-350, 2015.

VERMA, M.; GODBOUT, S.; BRAR, K.; SOLOMATNIKOVA, O. Biofuels production from biomass by thermochemical conversion technologies. **International Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 2012, 2012.

VURAL, D.; SMITH, J.C.; PETRIDIS, L. Dynamics of the lignin glass transition. **Physical Chemistry Chemical Physics**, [s. l.], v. 20, n. 31, p. 20504–20512, 2018.

WANG, L.; RIVA, L.; SKREIBERG, O.; KHALIL, R. A.. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. **Energy and Fuels**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 15343–15354, 2020.

WANG, S.; DAI, G.; HAIPING, Z.; LUO, Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 62, p. 33–86*al.*, 2017.

WANG, G.J.; LUO, Y.; DENG, J.; JIANGHONG, K.. Pretreatment of biomass by torrefaction. **Chinese Science Bulletin**, [s. l.], v. 56, n. 14, p. 1442–1448, 2011.

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**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 99–105, 2011.

WEN, J.L.; SUN, S.L.; YUAN, T.Q.; XU, F.; SUN, R.C. Understanding the chemical and structural transformations of lignin macromolecule during torrefaction. **Applied Energy**, [s. l.], v. 121, p. 1–9, 2014.

WHITTAKER, C.; SHIEL, D.I. **Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability—A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.7. p.1- 11. 2017.

XU, C.C.; FERDOSIAN, F. Structure and Properties of Lignin. *In*: [S. l.: s. n.], 2017. p. 1–12.

YANG, H.. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, [s. l.], v. 86, n. 12–13, p. 1781–1788, 2007.

YOGALAKSHMI, K.N.; POORNIMA, D.T.; SIVASHANMUGAM, P.; KAVITHA, S.; YUKESH K.R.; SUNITA, V.; ADISHKUMAR, S. GOPALAKRISHNAN, K.; RAJESH, B. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, [s. l.], v. 286, 2022.

YOO, C.G.; MENG, X.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A.J. **The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2020.

YOUSUF, A.; PIROZZI, D.; SANNINO, F. Fundamentals of lignocellulosic biomass. *In*: LIGNOCELLULOSIC BIOMASS TO LIQUID BIOFUELS. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 1–15.

YU, J.; PATERSON, N.; KOKOT-BLAMEY, J.; MILLAN, M.. Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Fuel**, [s. l.], v. 191, p. 140–149, 2017.

ZHANG, D.; WANG, F.; ZHANG, A.; YI, W.; LI, Z.; SHEN, X. Effect of pretreatment on chemical characteristic and thermal degradation behavior of corn stalk digestate: Comparison of dry and wet torrefaction. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 275, p. 239–246, 2019.

ZHANG, Y.; CHEN, F; CHEN, D. CEN, K.. Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 2061–2070, 2022.

ZHANG, Y.; NAEBE, M. **Lignin: A Review on Structure, Properties, and Applications as a Light-Colored UV Absorber**. [S. l.]: American Chemical Society, 2021.

ZHANG, J.; ZHANG, X. The thermochemical conversion of biomass into biofuels. *In*: BIOMASS, BIOPOLYMER-BASED MATERIALS, AND BIOENERGY: CONSTRUCTION, BIOMEDICAL, AND OTHER INDUSTRIAL APPLICATIONS. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 327–368.

ZHENG, Y.; SHI, J.; TU, M.; CHENG, Y. Principles and Development of Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Biofuels. **Advances in Bioenergy**, [s. l.], v. 2, p. 1–68, 2017.