

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**ANA PAULA DE SOUZA SILVA**

**POTENCIAL DO USO DA BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO  
DE ENERGIA: ESTUDO DE CASO DE UMA SERRARIA NO ESTADO  
DO PARÁ**

**SÃO PAULO**

**2023**

**ANA PAULA DE SOUZA SILVA**

**POTENCIAL DO USO DA BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA: ESTUDO DE CASO DE UMA SERRARIA NO ESTADO DO PARÁ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da  
Universidade de São Paulo para a obtenção do título  
de Doutora em Ciências.

Orientadora: Prof. Dr. Suani Teixeira Coelho

Versão corrigida

SÃO PAULO

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Ana Paula de Souza.

Potencial do uso da biomassa florestal para geração de energia: estudo de caso de uma serraria no Estado do Pará. / Ana Paula de Souza Silva; orientadora: Suani Teixeira Coelho. – São Paulo, 2023.

111 f.: il., 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Bioenergia. 2. Aproveitamento Energético. 3. Resíduos florestais. 4. Fontes alternativas de energia. 5. Desenvolvimento Sustentável. I. Título

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: SILVA, Ana Paula de Souza

Título: Potencial do uso da biomassa florestal para geração de energia: estudo de caso de uma serraria no Estado do Pará.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Aprovado em: 17/08/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Presidente: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à minha mãe, Helena de Souza Silva (*in memoriam*) e ao meu pai Adão dos Santos da Silva, exemplos de amor, dedicação e de superação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a espiritualidade e ao meu Anjo da Guarda pela proteção em todos os momentos da minha vida.

Ao Programa de Pós Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo pela oportunidade.

Agradeço a minha orientadora, Professora Dra. Suani Teixeira Coelho por toda a experiência, auxílio, orientação e inspiração proporcionados nessa trajetória.

Agradeço aos Professores Dr. José Otávio Brito e Dr. Sebastião Renato Valverde pelas importantes contribuições e sugestões realizadas no exame de qualificação.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT pela oportunidade e apoio para a realização desse trabalho e, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos aos meus gestores imediatos que me deram suporte nesse período: Ligia Ferrari Torella di Romagnano, Maria Luiza Otero D’Almeida Lamardo, Fabrício Araújo Mirandola, Sofia Julia Alves M. Campos, João Carlos Savio Cordeiro e Adriana Garcia. Aproveito para agradecer carinhosamente os amigos “ipeteanos” que colaboraram diretamente com a elaboração desse trabalho, desde conversas para discutir e analisar dados técnicos e econômicos, elaboração de figuras, revisão do texto, compartilhamento de referências, entres outras tantas atividades que um trabalho como essa demanda: Caroline Almeida Souza, Edna Baptista dos S Gubitoso, Gabriela Papoulias França, Mariana Hortelani Carneseca Longo, Stephanie Marinho Cordeiro e Yuri Basile Tukoff Guimarães. E, também quero agradecer os colegas do Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética e do Núcleo de Florestas apoiadores e presentes nessa caminhada.

Quero demonstrar a minha imensa gratidão a “Serraria do Gaúcho” pelo fornecimento de dados e informações essenciais para o desenvolvimento e elaboração desse trabalho, em especial ao Senhor Altemir André Schimitt que abriu as portas para essa pesquisa e, aproveito para agradecer também a todos os funcionários da Serraria que me receberam muito bem.

Agradeço aos funcionários do IEE, principalmente aos da Secretaria de Pós Graduação: Adriana Fátima Pelege, Juliana Oliveira da Silva, Raphael Caio Alvarez Diegues e Renata Boaventura que me auxiliaram e me ajudaram em diversas solicitações.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBio), em especial a Vanessa Garcilasso, Marilín Mariano e Roberto Sartori, por todas as conversas, ajudas e orientações prestadas nesse período.

Às amigas amadas de Viçosa que estão partilhando essa trajetória comigo e, colaborando ativamente para esse trabalho ser concluído: Camila Savastano de Queiroz, Daniela Higgin do Amaral e Sigrid Aquino Neiva.

E aos amigos queridos que o IEE/USP trouxe para a minha vida compartilhando momentos de alegria, ansiedade e dificuldade, mas, sempre colaborando para a vida ficar mais leve: Ariane Finotti, Laize Sampaio, Mônica Anater e Pedro Paulo Fernandes da Silva.

Agradeço a Família Marques e a “Quatizada”, sempre presentes em minha vida e, em especial ao meu pai e aos meus sobrinhos, por todo o apoio e, agradeço também aos meus amigos de perto e de longe pelo companheirismo nessa jornada chamada vida!!! E, quero deixar um agradecimento mais que especial para minha “cãopanheirinha” de aventuras que chegou na pandemia e, encheu a minha vida de Amor e alegria: Tuia.

Por fim, deixo um agradecimento a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho. Meu muito obrigada!!!

*“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. ”*

João Guimarães Rosa



## RESUMO

SILVA, Ana Paula de Souza. **Potencial do uso da biomassa florestal para geração de energia: estudo de caso de uma serraria no Estado do Pará.** 2023. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGE), Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

O Brasil é um país que tem sua matriz energética fortemente baseada em fontes renováveis, dentre elas a biomassa. A biomassa advinda de materiais lignocelulósicos é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos como a celulose, hemicelulose e lignina e pequenas quantidades de extrativos e cinzas, contidos na parede celular das plantas. Dentre as principais biomassas brasileiras está a florestal, a qual pode ser proveniente de plantios florestais de espécies como o eucalipto e o pinus ou pode ser gerada por resíduos na colheita e no processamento primário (desdobro) da madeira originada em florestas tropicais na Amazônia. Só no ano de 2021 foram extraídos mais de 14 milhões de m<sup>3</sup> de madeira em tora, sendo os maiores produtores os Estados de Mato Grosso, Pará e Rondônia. Por conta do baixo nível tecnológico e outras características das espécies florestais, o rendimento em madeira serrada é baixo e o volume gerado de resíduos passa de 50% do volume da madeira beneficiada. Dessa forma, o produto residual gerado, a exemplo da serragem, maravalhas, aparas, costaneiras, e outros, precisa ter uma correta destinação. Assim, o conhecimento das características físico-químicas, como análise elementar e imediata e o poder calorífico, colaboram para um melhor planejamento do aproveitamento energético na escolha da tecnologia que será mais adequada. Processos termoquímicos como combustão, gaseificação e pirólise, além de processos de compactação como briquetagem e peletização dos resíduos, são opções para o reaproveitamento da biomassa florestal gerada nas serrarias, podendo colaborar ainda com a transição energética no âmbito local. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo avaliar o estudo de caso de uma Serraria localizada na cidade de Santarém, no Estado do Pará, quantificando os resíduos gerados em sua operação, realizando a caracterização físico-química e propondo soluções para o seu aproveitamento, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais. A Serraria em questão gera um pouco mais de 50% de volume de resíduos, que atualmente são doados para empresas da região. Diante disso, foi coletado uma amostra composta da serragem gerada na atividade de desdobro que apresentou características como poder calorífico inferior (PCI) de 13.495,45 kJ/kg e teor de cinzas de 1,4 %. Foram avaliadas três alternativas de reaproveitamento de resíduos: geração de energia em caldeira usando parte em estufa para secagem da madeira serrada, parte para operação da serraria e o excedente poderá ser vendido para a rede de distribuição; produção e comercialização de briquetes e; venda da biomassa *in natura*. Das alternativas citadas, a mais viável economicamente é a venda de biomassa *in natura*, por possuir um baixo valor de investimento em equipamentos. Porém, a solução de geração de energia, mesmo apresentando um alto valor de investimentos com a aquisição de equipamentos, agrega valor à qualidade da madeira com o melhor controle da secagem e em menor tempo e ainda faz com que a Serraria seja autossuficiente em energia elétrica advinda de fonte renovável, minimizando os efeitos das mudanças climáticas e colaborando com a economia circular.

**Palavras-chave:** Resíduos Florestais. Aproveitamento Energético. Tecnologias. Manejo Florestal Sustentável.

## ABSTRACT

SILVA, Ana Paula de Souza. **Potential use of forest biomass for energy generation: a case study of a sawmill, State of Pará, Brazil.** Thesis (Doctoral) – Post-Graduation Program in Energy (PPGE), Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, 2023.

Brazil is a country whose energy matrix is firmly based on renewable sources, including biomass. Biomass from lignocellulosic materials is a complex mixture of natural polymers of carbohydrates as cellulose, hemicellulose, and lignin and small amounts of extractives and ashes in the plant cell wall. Forestry is one of the leading Brazilian biomass sources, which includes forest plantations of fast-growth species, for instance, eucalyptus and pine, and residues of the harvest and primary processing (splitting) of wood from tropical forests in the Amazon. In 2021 alone, more than 14 million m<sup>3</sup> of log wood were extracted, with the largest wood producers being the states of Mato Grosso, Pará, and Rondônia. Due to the low technological level and other characteristics of the forest species, the yield of sawn wood is low and the volume of waste generated exceeds 50% of the volume of processed wood. Waste generated such as sawdust, wood shavings, shavings, coastal, and others, must be correctly disposed of. Knowing the physicochemical characteristics as elemental and immediate analysis and the calorific value collaborate for a better planning of energy use in choosing the technology that will be most suitable. Thermochemical processes such as combustion, gasification, and pyrolysis, as well as compression processes such as briquetting and pelletizing of residues, are options for reusing the forest biomass generated in the sawmills and may even collaborate with energy transition at local level. Hence, this work aimed to evaluate the case study of a sawmill located in the city of Santarém, State of Pará, Brazil, by quantifying the waste generated in its operation, carrying out its physicochemical characterization, and proposing solutions for its use considering technical, economic and environmental criteria. The sawmill, the object of this work, generates about 50% of waste currently donated to regional companies. A sample of sawdust generated in the sawmilling activity was collected, which presented characteristics such as lower heating value (LHV) of 13.495.45 kJ/kg and ash content of 1.4%. The following alternatives for reuse of waste were evaluated: a) generation of energy in a boiler using part in a kiln to dry the sawn wood, part for operating the sawmill and the surplus to be sold to the energy company and incorporated in the energy distribution network; b) production and commercialization of briquettes and; c) sale of biomass. The most economically viable alternative was the sale of biomass (alternative c) because of its low investment need to acquire equipment. However, the energy generation solution (alternative a), besides the need of a higher investment for the acquisition of equipment, had an added value to the quality of wood due to better control of the drying process in less time and also turning the Sawmill self-sufficient in electricity from a renewable source, minimizing the effects of climate change and collaborating with the circular economy.

**Keywords:** Forest Waste. Energy Use. Technologies. Sustainable Forest Management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo mundial de energia por fonte e estimativas de consumo até o ano de 2040 .....	21
Figura 2: Proporção de uso de madeira como combustível energético em diferentes regiões do mundo .....	32
Figura 3: Participação da bioenergia no consumo final de energia, geral e por setor no mundo em 2020. ....	33
Figura 4: Pessoas sem acesso à eletricidade e energia para cocção. ....	35
Figura 5: Mortes prematuras pela poluição do ar e população sem acesso à energia limpa para cocção .....	36
Figura 6: Contribuição de combustíveis derivados de madeira na energia da biomassa global .....	38
Figura 7: Processos de conversão de biomassa, produtos e aplicações.....	51
Figura 8: Etapas da produção de carvão vegetal .....	52
Figura 9: Fontes e rotas renováveis de produção de hidrogênio .....	58
Figura 10: Localização da “Serraria do Gaúcho” .....	63
Figura 11 (A e B): Pátio de estocagem de toras e Pátio de Expedição de produtos de madeira.....	64
Figura 12 (A e B): Disposição de resíduos no entorno da serraria.....	66
Figura 13: Caminhão sendo carregado com resíduos para doação.....	68
Figura 14 (A e B): Pilhas de madeira em Processo de secagem em pátio coberto.....	70
Figura 15: Exemplo de estufa de secagem para madeira serrada .....	70
Figura 16: Pilha de serragem localizada na “Serraria do Gaúcho” .....	72
Figura 17 (A e B): A: Equipamento <i>Flash</i> 2000 - Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio e B: Equipamento <i>Calorimeter</i> 6400 .....	73
Figura 18: Principais formas de aproveitar os resíduos gerados em serrarias.....	78
Figura 19 Aproveitamento de resíduos para uso energético na serraria.....	79
Figura 20: Aproveitamento de resíduos para fabricação de briquetes.....	81
Figura 21: Aproveitamento de resíduos na forma de comercialização .....	82

Figura 22: Fluxo de caixa (Modelo 1).....	86
Figura 23: Fluxo de caixa (Modelo 2).....	89
Figura 24: Fluxo de caixa (Modelo 3).....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Empreendimentos de geração de energia em operação, a partir de biomassa florestal ou algum resíduo do setor florestal instalado na Amazônia Legal.....	49
Quadro 02: Empreendimentos de geração de energia em operação, a partir de biomassa instalado no Estado do Pará.....	49
Quadro 03: Hidrogênio e suas cores.....	57
Quadro 04: Pontos fortes e pontos de atenção das 03 soluções para aproveitamento de resíduos.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Área com florestas no mundo em 2017 .....	31
Tabela 02: Espécies Florestais adquiridas para processamento na “Serraria do Gaúcho” ..	65
Tabela 03: Resultados da caracterização físico-química realizado em amostra composta de serragem.....	73
Tabela 04: Parâmetros técnicos para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos da “Serraria do Gaúcho” .....	75
Tabela 05: Parâmetros técnicos para o cálculo da produção de vapor na caldeira a partir dos resíduos da “Serraria do Gaúcho” .....	80
Tabela 06: Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo incluindo receitas de vendas de madeiras e energia elétrica (Modelo 1).....	84
Tabela 07: Fluxo de caixa (Modelo 1) .....	85
Tabela 08: Indicadores econômico-financeiros (Modelo 1).....	87
Tabela 09: Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo de receitas de vendas de briquetes (Modelo 2).....	88
Tabela 10: Fluxo de caixa (Modelo 2).....	88
Tabela 11: Indicadores econômico-financeiros (Modelo 2).....	89
Tabela 12: Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo de receitas de venda de biomassa (Modelo 3).....	90
Tabela 13: Fluxo de caixa (Modelo 3).....	91
Tabela 14: Indicadores econômico-financeiros (Modelo 3).....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de Preservação Permanente
ASV	Autorização para Supressão da Vegetação
AUTEX	Autorização de Exploração
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento
BTG	<i>Biomass Technology Group</i>
C	Carbono
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCUS	<i>Carbon capture, utilisation and storage</i>
CENBIO	Centro Nacional de referência em biomassa
CEPROF	Sistema de Cadastro de Consumidores de Produtos Florestais
CERFLOR	Programa Brasileiro de Certificação Florestal
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Coomfloona	Cooperativa Mista da Flona Tapajós
CRV	Coefficiente de rendimento volumétrico
DOF	Documento de Origem Florestal
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapii	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FC	Fator de Capacidade
FINAME	Financiamento de máquinas e equipamentos
FLOE	Floresta Estadual
FLONA	Floresta Nacional
FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
GBPE	<i>Global Bioenergy Partnership</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa

GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H	Hidrogênio
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
ha	Hectare
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IMAFLOA	Instituto de Manejo e Certificação Florestal Agrícola
IMAZON	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
kg/h	Quilograma por hora
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
kgf/cm <sup>2</sup>	Quilograma força por centímetro quadrado
Kj/kg	Quilojoules por quilo
km	Quilômetro
kW	Quilowatt
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MFS	Manejo Florestal Sustentável
MJ/Kg	Megajoule por quilograma
mm	Milímetros
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
Mt	Milhões de toneladas
MV	Materiais Voláteis
MW	Megawatt
MWh <sub>th</sub> /t	Megawatt hora por tonelada
N	Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio
O	Oxigênio
°C	Graus Celsius



ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PEFC	<i>Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes</i>
PEVS	Produção de Extração Vegetal e da Silvicultura
PFNM	Produto Florestal Não Madeireiro
PIB	Produto Interno Bruto
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRODES	Projeto de Monitoramento de Desmatamento na Amazônia Legal por Satélites
RDS	Reserva de Desenvolvimento Sustentável
RE	Reserva Extrativista
REN	<i>Renewables</i>
RL	Reserva Legal
ROL	Receita Operacional Líquida
S	Enxofre
Sebrae	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SEMAS	Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará
SEMIL	Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINAFLOR	Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais
SISFLORA	Sistema de Comercialização e Transporte de Produtos Florestais
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
t	Tonelada
TCF	Teor de Carbono Fixo
TCZ	Teor de cinzas
TI	Terra Indígena
TIR	Taxa Interna de Retorno

TMA	Taxa Mínima de Atratividade
ton/h	Tonelada por hora
TQ	Terras Quilombolas
TU	Teor de Umidade
UC	Unidade de Conservação
VPL	Valor Presente Líquido
WBA	<i>World Bioenergy Association</i>
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	23
<b>2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....</b>	<b>24</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	24
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
2.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	24
<b>3. A PRODUÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL E A SUSTENTABILIDADE.....</b>	<b>27</b>
3.1. A BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA .....	27
3.2. BIOMASSA FLORESTAL NO MUNDO .....	31
3.3. USO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL .....	38
3.4. A PRODUÇÃO DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS .....	43
3.5. INDÚSTRIA MADEIREIRA NA AMAZÔNIA LEGAL E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	47
<b>4. TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA .....</b>	<b>50</b>
4.2. COMPACTAÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES E <i>PELLETS</i> .....	53
4.3. PIRÓLISE RÁPIDA DE BIOMASSA .....	54
4.4. GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA .....	55
4.5. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE BIOMASSA .....	57
4.6. COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR DE MADEIRA .....	58
4.7. BIORREFINARIAS À BASE DE BIOMASSA FLORESTAL .....	60
<b>5. ESTUDO DE CASO: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RESÍDUOS DE UMA SERRARIA LOCALIZADA NO ESTADO DO PARÁ .....</b>	<b>61</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	61
5.2. ESTUDO DE CASO: QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS E SEU APROVEITAMENTO NA “SERRARIA DO GAÚCHO” .....	62
5.3. ASPECTOS REFERENTES À SECAGEM DE MADEIRAS .....	68
5.4. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE AMOSTRA DE RESÍDUOS DA SERRARIA ..	71

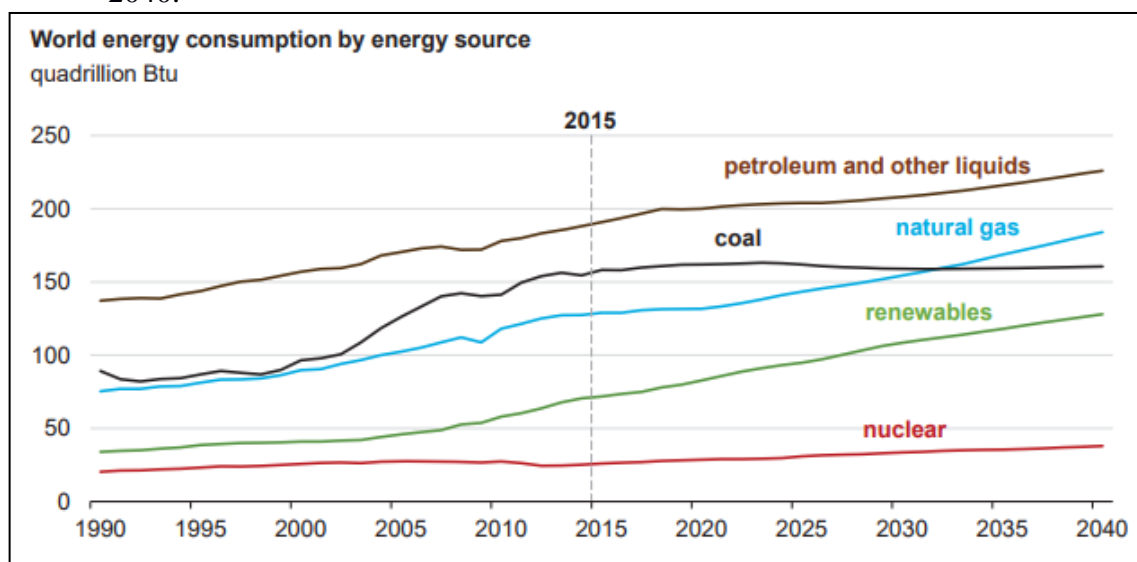
5.5. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DA SERRARIA .....	74
5.6. POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS GERADOS NA “SERRARIA DO GAÚCHO” .....	77
5.7. ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DAS SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA SERRARIA.....	82
5.7.1. <i>Considerações sobre a avaliação econômico-financeira preliminar das soluções de aproveitamento de resíduos da serraria.</i> .....	92
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global e os impactos das mudanças climáticas decorrentes das atividades humanas, fazem com que países busquem diferentes formas para mitigar e adaptar a esse contexto, pois as variações na temperatura têm sido cada vez mais intensas. Assim, torna-se necessário buscar alternativas ao uso de combustíveis fósseis, ao desmatamento e à descarbonização dos processos industriais. A matriz energética mundial é baseada fortemente em uso de combustíveis fósseis e, de acordo com Ren (2022), em 2020, 78,5% do total de energia final consumida foi proveniente de combustíveis fósseis, enquanto 12,6% corresponderam as energias renováveis modernas.

A **Figura 1** apresenta a evolução do consumo primário de energia de 1990 até os dias atuais e previsões até 2040, mostrando que fontes como o petróleo vão continuar sendo consumidas em grandes quantidades, assim como o gás natural e as fontes renováveis. (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017*). É válido ressaltar que esses dados ainda contemplam o uso da biomassa tradicional e moderno na parcela das energias renováveis.

**Figura 1:** Consumo mundial de energia por fonte e estimativas de consumo até o ano de 2040.



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2017)

Na atualidade, a busca por fontes de energia e combustíveis de origem renovável para substituir os de origem fóssil está constante nas pautas mundiais e, no Acordo de Paris no ano de 2015, os países se comprometeram a diminuir as suas emissões de gases de efeito estufa. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões em 37 % abaixo dos níveis de 2005 até 2025, sendo que para isso, prometeu aumentar a participação para 45 % de energias renováveis na

composição da matriz energética com importante participação da bioenergia sustentável (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2016).

Nesse contexto, a biomassa florestal poderá se destacar para colaborar com o país na conquista dessa meta, ressaltando que o Brasil possui uma forte vocação florestal com quase 498 milhões de hectares de florestas naturais e plantadas, correspondente a cerca de 58,5% de seu território, dos quais 98% é representado por florestas naturais e 2% por florestas plantadas, sendo, portanto, considerada a segunda maior área com florestas no mundo, atrás da Rússia (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2023). As florestas naturais incorporam as áreas dentro das Unidades de Conservação, tanto de proteção integral quanto de uso sustentável, as de Reserva Legal (RL), as de Preservação Permanente (APP), as terras indígenas e as florestas susceptíveis de uso dos biomas Amazônica, Cerrado e Mata Atlântica.

Segundo o Serviço Florestal Brasileiro (2023), o bioma Amazônia compreende uma área de 4,2 milhões de km<sup>2</sup>, ocupando quase 40% do país e é composto, principalmente, por florestas abertas e densas, abrigando também uma diversidade de outros ecossistemas, como florestas estacionais, florestas de igapó, campos alagados, várzeas, savanas, refúgios montanhosos, campinaranas e formações pioneiras. Ressalta-se que no bioma amazônico é encontrado grandes estoques de madeira comercial e de carbono, além de possuir uma gama de produtos florestais não madeireiros que permite a manutenção de diversas comunidades locais.

A Amazônia Legal é formada pelos seguintes estados brasileiros: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e 80% do estado do Maranhão, possuindo cerca de 5 milhões de km<sup>2</sup> composto por todo o bioma amazônico, além de parte do cerrado e do pantanal, representando, dessa maneira, 59% do território nacional. Em 2020, a região possuía 28,1 milhões de habitantes (cerca de 13% da população brasileira) e o Pará é o estado com maior população da região (8,8 milhões de habitantes). Acrescenta-se que em 2018 o Produto Interno Bruto (PIB) ultrapassou os R\$ 600 bilhões, não chegando a 9% do PIB nacional daquele ano (SANTOS *et al.*, 2021).

Ainda de acordo com os autores, a Amazônia Legal possui 45% do território composto por Áreas Protegidas. Tais áreas estão distribuídas em Unidades de Conservação (UC) de Uso Sustentável com cerca de 11%, Proteção Integral com 8%, Terras Indígenas (TI) com 23%, Áreas de Proteção Ambiental (APA) com 3% e Terras Quilombolas (TQ) com apenas 0,2% do território da região. E, segundo o MapBiomas (2020), cerca de 75% do território da Amazônia Legal é composto por florestas nativas e plantadas e vegetação secundária.

Uma questão de alerta no território da Amazônia Legal é o desmatamento. Segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi concluído que no período de

agosto de 2020 a julho de 2021 a estimativa de taxa de desmatamento foi de 13.235 km<sup>2</sup>, referente ao corte raso de cobertura nativa da região, sendo superior ao período anterior em 21,97%. O INPE lidera o Projeto de Monitoramento de Desmatamento na Amazônia Legal por Satélites – PRODES que realiza esses levantamentos, inclusive por Estado, destacando o Estado do Pará com uma das maiores taxas de desmatamento no período supracitado, com a estimativa de desmatamento em 5.257 km<sup>2</sup>, o que representa 39,72 % de toda a área desmatada na Amazônia Legal.

A Amazônia Legal é um importante guardião da bioeconomia mundial e um dos grandes ativos econômicos é a produção de madeiras que podem ser extraídas de florestas naturais e plantadas, gerando vários produtos, além da diversidade dos produtos florestais não-madeireiros (PFNM). No ano de 2019, segundo a Pesquisa sobre Produção de Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) realizada pelo IBGE, o valor de produtos florestais na região da Amazônia, como madeira em tora, lenha e produção de carvão, a partir de florestas nativas, foi de R\$ 2,3 bilhões. Já os produtos oriundos das florestas plantadas, como madeira, celulose e papel, atingiu o valor de R\$ 1,1 bilhão e, produtos como óleos essenciais, sementes, frutos, folhas, raízes, resinas e outros que compõem os PFNMs, totalizaram R\$ 842 milhões.

É importante destacar a grande produção de toras de madeira na Amazônia Legal com extração de mais de 10 milhões de metros cúbicos que, em sua maioria, passa pelo processamento primário (desdobras) em serrarias com baixo nível tecnológico e baixo rendimento em madeira serrada, gerando assim mais de 50% do volume serrado em resíduos.

Assim, esse estudo terá como foco levantar informações sobre a geração de resíduos, usos potenciais, tecnologias de aproveitamento energético e, valores de investimento de soluções para aplicação em uma serraria de pequeno porte, localizada no estado do Pará, que será o estudo de caso desse trabalho.

## 1.1. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após a introdução, o Capítulo 2 apresenta os objetivos e a relevância do trabalho. O Capítulo 3 demonstra o panorama geral da produção e uso de biomassa florestal no mundo e no Brasil, trazendo aspectos da sua sustentabilidade. O Capítulo 4 traz um levantamento de tecnologias de aproveitamento energético que podem ser utilizadas, a partir de biomassa, em especial a florestal. O Capítulo 5, por sua vez, propõe um estudo de caso de uma serraria localizada no Estado do Pará, apresentando a quantificação do volume de resíduos gerados em sua operação, caracterização físico-química dos resíduos e seu potencial de geração de energia

elétrica, além de soluções tecnológicas para o aproveitamento energético apropriadas para a sua realidade e de uma avaliação econômico-financeira preliminar com foco na avaliação dos investimentos a serem realizados nas referidas soluções apontando pontos fortes e de atenção.

Por fim, o Capítulo 6 aponta as principais conclusões obtidas no desenvolvimento desse trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

## **2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem o objetivo geral de avaliar o aproveitamento energético de resíduos gerados no processamento primário (desdobro) em uma serraria, localizada no Estado do Pará, partindo da hipótese de que o uso de resíduos é uma alternativa importante para gerar energia para a operação da serraria a partir de uma fonte renovável, trazendo benefícios técnicos, econômicos e ambientais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Quantificar o volume de resíduos gerados em serrarias;
- b) Caracterizar, por meio de análises físico-químicas, os resíduos gerados em uma serraria para avaliar o seu potencial de geração de energia elétrica;
- c) Estimar o potencial de geração de energia elétrica dos resíduos da serraria;
- d) Avaliar tecnologias de aproveitamento energético mais adequadas para a realidade de operação de serrarias da Amazônia;
- e) Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de implantar soluções tecnológicas para o aproveitamento energético de resíduos em serraria localizada no estado do Pará.

### **2.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO**

O Brasil é um país de dimensões continentais, com vantagens competitivas por possuir uma imensa agrobiodiversidade. O agronegócio brasileiro possui grande destaque mundial, com inúmeros plantios agrícolas e florestais, responsáveis por gerar uma variedade de resíduos.



Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), as principais cadeias do agronegócio para exportação no ano de 2020 foram soja, carnes, cereais, farinhas e preparações, produtos do segmento sucroalcooleiro e produtos florestais. Outros produtos como café, fibras e têxteis, fumo, sucos, frutas, derivados, verduras, legumes, raízes, tubérculos, chá e cacau também aparecem na pauta das exportações brasileiras.

Dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION*, 2022) indicam que os resíduos provenientes da atividade agroindustrial mundial podem chegar a 1,3 bilhão de toneladas por ano, sendo 1/3 dos alimentos destinados ao consumo humano, com significativa geração de resíduos oriundos de processamento ou perda nas cadeias produtivas do agronegócio. Com isso, o potencial de resíduos da biomassa advinda das plantações agrícolas e florestais no Brasil pode atingir a ordem de 451 Mt por ano (BENTSEN; FELBY, 2010), considerando o manejo agrícola e o processamento industrial. Ressalta-se, porém, a possibilidade de ocorrência de impactos ambientais, dependendo da destinação ou gerenciamento dos resíduos, os quais têm potencial para serem reaproveitados em diversas finalidades, como geração de energia, bioinsumos, biopolímeros, ração animal, entre outras. Com isso, analisar as principais biomassas, a área de plantio e produção, estimar a geração de resíduos em suas cadeias produtivas, avaliar a logística e disponibilidade, bem como, conhecer suas características físicas e químicas, colaboram para a definição e escolha dos potenciais mais adequados para aproveitamento ou desenvolvimento de novos produtos, otimizando o uso de recursos renováveis e colaborando com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – (ODS) preconizados pela Organização das Nações Unidas – (ONU).

Os resíduos de biomassa lignocelulósica tem em sua composição lignina, celulose e hemicelulose (LAURICHESSE; AVÉROUS, 2014), apresentando grande potencial para serem utilizados em aproveitamento energético ou como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, polímeros e insumos químicos e outros produtos (DUVAL; LAWOKO, 2014).

A biomassa tem o potencial de prover uma solução rentável e sustentável no fornecimento de energia e, simultaneamente, poderá colaborar com os países a cumprir suas metas na mitigação de CO<sub>2</sub>. Portanto, identificar os principais resíduos gerados e sua disponibilidade nas principais cadeias agrícolas e florestais, bem como suas características físico-químicas e seu potencial energético, colabora com a base do conhecimento para elaboração de projetos e proposição de soluções para fomentar o aproveitamento da biomassa como energia.

Nesse sentido, a biomassa florestal surge como um importante insumo a ser avaliado para aproveitamento energético, pois além do Brasil possuir uma forte vocação florestal tanto no segmento de florestas plantadas, quanto nativas, produzindo biomassa transformada em cavacos ou como lenha para queima direta ou gerando resíduos que podem ser utilizados na produção de carvão vegetal, briquetes e *pellets*, os resíduos oriundos da biomassa ainda possuem como características baixo teor de cinzas e enxofre e grande quantidade de carbono, colaborando com a eficiência da queima durante o processo de combustão (GARCIA *et al.*, 2021).

Diante disso, muitas pesquisas e trabalhos vem sendo realizados no campo da energia da biomassa florestal, englobando desde a quantificação de resíduos que devem ser deixados no campo após a colheita, a exemplo do percentual aproveitável em processos energéticos, como também a quantificação de resíduos em serrarias na Amazônia e as formas de aproveitamento destes resíduos, seu potencial energético, caracterização elementar, química e energética dos resíduos, rendimento de madeira serrada, gestão, uso e armazenamento de resíduos, avaliação econômica do aproveitamento de resíduos e tecnologias de aproveitamento.

Como exemplos de trabalhos é possível citar os seguintes:

- Aproveitamento dos resíduos de serraria na geração de energia elétrica no município de Ulianópolis, estado do Pará: Estudo de caso para o incentivo à exploração florestal Sustentável da Amazônia, dissertação de mestrado de Américo Varkulya Junior no ano de 2004;
- Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia— uma análise da cadeia produtiva de Rafael Leite Braz et al no ano de 2014;
- Aproveitamento de resíduos de madeira em três empresas madeireiras do Estado do Pará de autoria de Joaquim Ivanir Gomes e Simonne Silva Sampaio em 2004;
- Tecnologias de Geração de Eletricidade Para o Aproveitamento Energético de Resíduos de Biomassa em Comunidades Isoladas, dissertação de Mestrado de Pedro Jessid Pacheco Torres no ano de 2017;
- Avaliação do gerenciamento de resíduos sólidos em indústrias de extração e transformação de madeira localizadas na Amazônia mato-grossense, dissertação de Mestrado de Marcelo Elias dos Santos no ano de 2011.

Assim, o presente trabalho “Potencial do uso da biomassa florestal para geração de energia: estudo de caso de uma serraria no Estado do Pará” tem o propósito de quantificar o volume de resíduos gerados em uma serraria, avaliar a sua composição físico-química, calcular

o potencial de geração de energia elétrica de seus resíduos, avaliar tecnologias disponíveis comercialmente para aproveitamento energético, avaliar os investimentos necessários para a aquisição de máquinas e equipamentos, visando agregar valor ambiental e econômico às serrarias que fazem o processamento primário (desdobro) da madeira na Amazônia.

A originalidade desta pesquisa está baseada na utilização de dados da operação de uma serraria que atualmente não possui um reaproveitamento energético de seus resíduos, propondo soluções tecnológicas adequadas à sua realidade e avaliando aspectos técnicos, ambientais e econômicos que irão agregar valor aos seus produtos, gerando energia de fonte renovável. Diante disso, a hipótese desta tese é de que o aproveitamento energético de resíduos em serrarias possui viabilidade técnica, econômica e ambiental para melhorar as condições de sustentabilidade da serraria.

### **3. A PRODUÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL E A SUSTENTABILIDADE**

#### **3.1. A BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA**

Para a transformação da biomassa florestal em energia (calor, vapor, eletricidade) ou biocombustível, processos como a queima direta em termelétricas (combustão), a compactação (produção de briquetes e *pellets*), a gaseificação, a pirólise rápida e a carbonização da madeira para produção de carvão vegetal precisam ser melhor investigados, de modo que seja possível conhecer o atual estágio tecnológico em que se encontra essa cadeia, tornando esse processo aplicável em situações reais, como o caso de inúmeras serrarias que fazem o processamento primário (desdobro) da madeira e geram grandes quantidades de resíduos, os quais, muitas vezes ainda não possuem um aproveitamento viável do ponto de vista técnico, econômico, ambiental e social e que poderiam agregar valor à própria serraria, contribuindo com a economia circular no âmbito local.

A crescente demanda por combustíveis e substituição de energia de origem fóssil faz com que se busque alternativas renováveis à essa matéria-prima. Combustíveis de origem fóssil são grandes emissores de gases de efeito estufa, que potencializam as mudanças climáticas, trazendo danos ao meio ambiente. Logo, a busca por fontes renováveis que sejam competitivas economicamente e que possuam ganhos ambientais, sendo sustentáveis, são bem-vindas e demandadas mundialmente.

Nesse cenário, a biomassa pode ser definida como qualquer matéria orgânica, de origem animal ou vegetal (SAIDUR *et al.*, 2011), que pode ser transformada e fornecer energia, na forma de calor ou eletricidade. Entende-se, portanto, que a biomassa é considerada um material orgânico oriundo de fontes vivas (EOM *et al.*, 2011), como a cana-de-açúcar, madeiras, resíduos agroindustriais, dentre outros.

A biomassa, ou material lignocelulósico, é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos como a celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de extrativos e cinzas, contidos na parede celular das plantas. A parte correspondente às cinzas é constituída por óxidos de cálcio, potássio, sódio, magnésio, silício, ferro e fósforo e seu conteúdo é menor que um 1% em massa. Os teores de extrativos, como terpenos, resinas, ácidos graxos, taninos, pigmentos e carboidratos ficam entre 2 e 5 % em massa. (CORTEZ *et al.*, 2008).

Segundo Braga (2012), a celulose é o principal componente presente na biomassa com teores de 40 a 80 %, já a hemicelulose é o segundo componente em quantidade, apresentando valores entre 15 e 40 % e a lignina é o terceiro componente em proporção, apresentando teores de 10 a 30 %.

Segundo Brito (2007), a madeira que sempre foi chamada de lenha e, nessa forma sempre participou da evolução histórica da humanidade como fonte de energia para cocção e uso residencial, além de aquecimento e combustível para diversos fins industriais, transforma-se em energia térmica, mecânica e elétrica.

Assim, a conversão de biomassa em energia para utilização pela sociedade tem início com o próprio homem primitivo. Dentre as biomassas amplamente utilizadas está a florestal, em que o uso da lenha possibilitou gerar calor, aquecer o ambiente e cozinhar os alimentos, trazendo importantes impactos para a evolução do homem e da organização social. A obtenção da energia da biomassa também evoluiu e passou a constituir parte significativa da matriz energética do mundo. Segundo dados da Agência Internacional de Energia, publicados no *Renewable Information Overview* em 2022, 6,7% da matriz energética mundial no ano de 2020 esteve relacionando ao uso tradicional de biomassa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Para compreender o uso de biomassa no mundo, é necessário entender a classificação proposta por Karekesi *et al.* (2005), conforme a seguir:

- Uso tradicional da biomassa: combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão em tecnologias de baixa eficiência;

- Biomassa “aperfeiçoada”: tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão de biomassa, tais como fogões e fornos com algum grau de aproveitamento dos gases gerados (*clean cooking*);
- Uso moderno da biomassa: tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e biocombustíveis.

É importante destacar que o uso moderno da biomassa para geração de calor, vapor, eletricidade e biocombustíveis pode ser uma importante estratégia para maximizar o uso de fontes renováveis na matriz energética mundial. O Brasil possui vantagens em relação a outros países para produção de energia e biocombustíveis a partir de diferentes biomassas, podendo ocupar uma posição de destaque na busca pela descarbonização dos processos industriais.

Ressalta-se a diversidade de biomassas plantadas (cana-de-açúcar, florestas, capim elefante, oleagionosas) e resíduos gerados em diferentes cadeias produtivas (bagaço e palha de cana-de-açúcar, resíduos florestais, vegetais, sólidos urbanos, animais, industriais) no Brasil, além da imensa quantidade de áreas degradadas ou ociosas em que poderiam aumentar a área plantada com diferentes culturas sem competir com aquelas voltadas para produção de alimentos, bem como a melhor utilização dos resíduos gerados nas diferentes cadeias produtivas de origem agroflorestal. Dentre as diversas biomassas encontradas no país, uma que merece destaque especial é a de origem florestal.

O Brasil possui vantagens competitivas em relação a outros países para os plantios florestais de espécies como o eucalipto e o pinus devido às altas produtividades, podendo ser cortadas em 7, 6, 5 anos ou até em menor tempo, dependendo do manejo silvicultural aplicado. Outro fator que contribui para o mercado brasileiro de biomassa é a produção de madeira tropical com baixo rendimento em processamento, a qual gera uma grande quantidade de resíduos que podem ser utilizados no aproveitamento energético e na produção de biocombustíveis, colaborando com a descarbonização dos processos industriais, a partir de uma fonte limpa.

Com esta forte vocação florestal, o país conta com quase 498 milhões de hectares de florestas nativas e plantadas, o que corresponde a aproximadamente 58,5% de seu território (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2023). As florestas nativas estão divididas entre os biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal e, nesses biomas existem uma grande diversidade de áreas protegidas, que segundo o *World Wildlife Fund* (2019), 18% do território brasileiro, o equivalente a cerca de 1,6 milhão de km<sup>2</sup>, são cobertos por unidades de conservação, porém apenas 6% são da categoria de proteção integral. Pela legislação ambiental brasileira, como o Código Florestal de 1965 (BRASIL, 1965) há as áreas

de preservação permanente – (APP) e as áreas destinadas à reserva legal – (RL), sendo que o seu percentual vai depender do bioma em que a propriedade está inserida.

Em relação às florestas plantadas para usos comerciais, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apresentou dados referentes ao ano de 2021, indicando a existência de 9,5 milhões de hectares de área plantada, sendo as duas espécies principais o eucalipto e o pinus, com 76,85% e 18,94% da área, respectivamente.

Uma das mais importantes áreas produtoras de madeira de florestas tropicais no mundo é a Amazônia Legal, composta por 75% do seu território dividido entre florestas nativas, plantadas e vegetação secundária (MAPBIOMAS, 2020). Nessa região foram produzidos 11,4 milhões de metros cúbicos de toras de madeira no ano de 2020, com destaque para os estados de Mato Grosso, Pará e Rondônia (LENTINI *et al.*, 2021). Essa madeira passa por processamento primário na própria região amazônica, com baixa agregação de valor e grande geração de volume de resíduos madeireiros que, muitas vezes, não são reaproveitados adequadamente.

É importante destacar que, de um lado, a Amazônia Legal produziu no ano de 2021 mais de 27% da energia elétrica do país a partir de usinas hidrelétricas, consumindo cerca de 11% e exportando o restante. Em contrapartida, mais de 3 milhões de habitantes, não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), são abastecidos por energia proveniente de usinas termelétricas à óleo diesel e ainda há uma parcela significativa de quase um milhão de habitantes sem acesso em tempo integral à energia e, que por meio de geradores, são abastecidos em alguns momentos do dia (LEITE; SOUSA, 2020). Frente ao exposto, o grande volume de resíduos gerados no processamento primário da madeira (cerca de 50% do volume serrado de madeira) poderia ajudar a suprir essa demanda de energia em sistemas isolados, colaborando com a mudança de combustível fóssil para renovável.

Nesse sentido, a madeira e seus resíduos pode ter papel importante no atendimento da demanda energética da região da Amazônia Legal, sendo necessário avaliar e analisar os números da produção florestal nativa e comercial, sua respectiva geração de resíduos e o seu potencial de reaproveitamento, seja para uso energético ou outros reaproveitamentos como a produção de pequenos objetos e utensílios de madeira e, ainda avaliando quais tecnologias serão mais viáveis tecnicamente e economicamente.

### 3.2. BIOMASSA FLORESTAL NO MUNDO

O setor florestal, incluindo florestas nativas e plantadas para uso comercial, é o maior contribuinte para o suprimento de biomassa global, principalmente para lenha e carvão vegetal (WBA, 2017). Além disso, é importante considerar a magnitude do uso tradicional da biomassa, em especial o da lenha para o uso residencial.

Segundo a *Food and Agriculture Organization* (2020), o mundo conta com mais de 4 bilhões de hectares de florestas, ou seja, mais ou menos 1/3 do planeta está coberto por área com florestas, o que equivale a cerca de 0,52 ha por habitante e 54% da área florestal se encontra em 05 países: Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China com respectivamente, 815, 497, 347, 310 e 220 milhões de ha totalizando 2,186 bilhões de ha.

A *World Bioenergy Association* (2019) traz dados por continente, em que o continente americano, incluindo as Américas do Norte, Central e do Sul, detém a maior quantidade de terras florestais com quase 40% da área florestal nessa região. Já a Europa segue em segundo, com cerca de 25%, em grande parte graças a contribuição das áreas de florestas na Rússia. O continente Asiático, por sua vez, detém a maior participação de florestas plantadas (**Tabela 01**).

**Tabela 01:** Área com florestas no mundo em 2017

Região	Área Florestal (ha)	Florestas Primárias (ha)	Florestas Secundárias (ha)	Florestas Plantadas (ha)
África	618	135	473	16,3
Américas	1589	720	814	58,3
Ásia	595	117	347	129
Europa	1016	278	652	85,5
Oceania	174	35,3	142	4,38
Mundo	3993	1277	2429	293

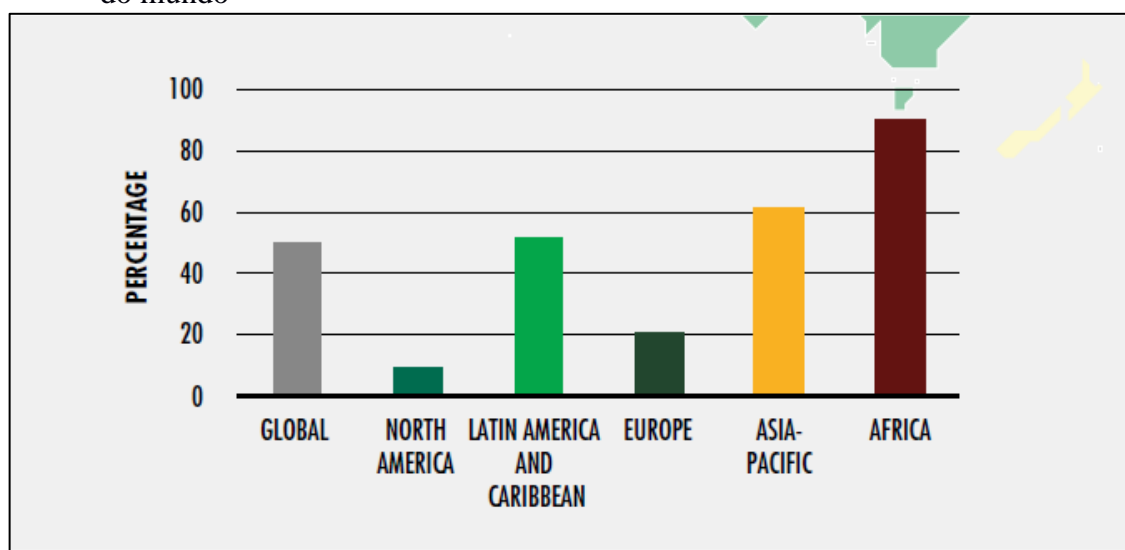
\*Milhões de ha

Fonte: Adaptado de WBA (2019)

Segundo a FAO (2018) cerca de 50% da madeira extraída de florestas em todo o mundo anualmente (em torno de 1,86 bilhões de metros cúbicos) é usada como combustível, para cozinhar e aquecer residências, para pequenas atividades industriais (como fabricação de tijolos e processamento de chá) e, em menor escala, para produzir eletricidade.

Conforme indicado na **Figura 2**, a participação da madeira no uso de energia varia entre as regiões, atingindo 90% na África e mais de 60% na Ásia. Cerca de 40% da madeira do mundo é consumida na Ásia, 36% na África, 17% na América e 8% na Europa (*FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2017* apud *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2018*).

**Figura 2:** Proporção de uso de madeira como combustível energético em diferentes regiões do mundo



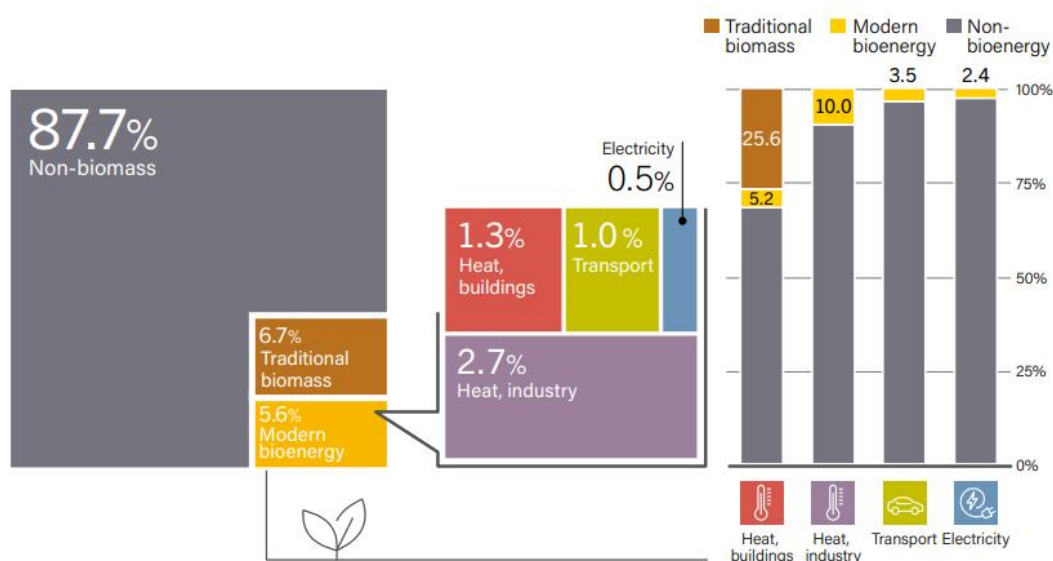
Fonte: FAO (2018)

A *Food and Agriculture Organization*, com base em dados de 2011, estimou que o consumo de lenha representa cerca de 6% do total da oferta primária de energia do mundo. A África é responsável por 27% do fornecimento de energia primária. Em geral, a madeira contribui com mais da metade do fornecimento nacional de energia primária em 29 países, dos quais 22 estão na África Subsaariana (*FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2014* apud *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2018*).

Assim, dados de 2020, mostram que a participação das energias renováveis modernas era de 5,6% no consumo final (REN21, 2022), incluindo o uso moderno da biomassa (**Figura 3**). Nesse valor não está sendo contabilizado o uso tradicional da biomassa que, nesse ano, foi de 6,7%. Parte da biomassa que é utilizada de forma tradicional (lenha, resíduos agrícolas e esterco animal) é obtida de forma não sustentável e corresponde às regiões rurais de países em desenvolvimento onde a população não tem acesso a outra forma de energia, em especial para cocção. Vale ressaltar que o uso tradicional da biomassa não é igualmente distribuído e tem forte relação com fatores econômicos dos países que dependem desse insumo para ter acesso à energia.



**Figura 3:** Participação da bioenergia no consumo final de energia, geral e por setor no mundo em 2020.



Fonte: REN21 (2022)

A biomassa, quando utilizada de forma tradicional, representada pela lenha e carvão vegetal, obtidos de forma não sustentável e ineficiente, é ainda a fonte de energia utilizada para fins de sobrevivência, aquecimento e cocção em muitos lugares do mundo. Isso é observado, principalmente, em locais menos desenvolvidos, com menor IDH e baixa geração de renda, evidenciando disparidades sociais e econômicas no uso dessa fonte de energia. Mais de 90% da população dos países mais pobres da África, Ásia e América Latina dependem de lenha, carvão vegetal e resíduos de cultivo como única fonte disponível para energia (*GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP*, 2014).

Parte da biomassa utilizada de forma tradicional não é renovável, pois muitas vezes é proveniente de desmatamento e apresenta baixa eficiência, sendo uma fonte de energia geralmente não comercial, já que advém da própria coleta ou catação manual. Por outro lado, o uso moderno da biomassa desconsidera o uso tradicional da biomassa e inclui madeira de floresta plantada, resíduos sólidos urbanos e de atividade agrícola, que além do uso direto, também são utilizados para geração de eletricidade.

Uma das questões envolvidas na contabilização do uso e geração de energia renovável é que a biomassa, em muitos estudos, entra como fonte renovável tanto no seu uso moderno quanto no uso tradicional, mesmo que parte da biomassa usada de forma tradicional não seja obtida de forma renovável e/ou sustentável. Essa não distinção entre a forma de uso da biomassa pode trazer uma interpretação equivocada da participação das renováveis, já que o uso

tradicional da biomassa tem um peso considerável no consumo de energia primária no mundo e não é produzida de forma sustentável.

Dessa maneira, a parcela das energias renováveis é menor quando é feita a distinção entre uso moderno e tradicional da biomassa. Assim, a noção real da participação e evolução das energias renováveis no consumo de energia no mundo passa por uma análise do uso residencial de biomassa, em especial da lenha, já que boa parte da biomassa que é utilizada pela população para cocção de alimentos, principalmente em países em desenvolvimento é obtida de forma não sustentável e ineficiente.

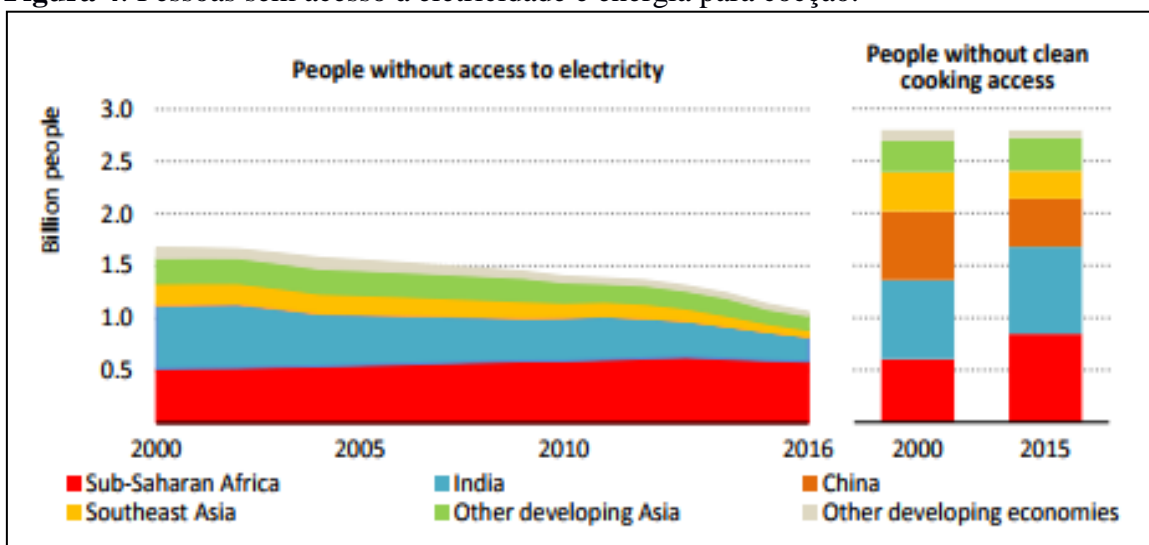
O uso tradicional da biomassa vem diminuindo em nível mundial e sendo substituída por tecnologias mais eficientes de geração de energia, como por exemplo, o uso moderno da biomassa, a energia solar e a geotérmica, que tiveram sua participação aumentada no fornecimento de energia para geração de calor e eletricidade nos últimos anos em residências.

Em 2016, foi estimado que a população dependente de biomassa, em especial a lenha, até 2030 seja reduzida de 52% para 42% da população dos países em desenvolvimento. Porém, o número absoluto de pessoas dependentes tende a aumentar devido ao crescimento da população mundial (*GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP*, 2014). Assim, comprova-se a manutenção de um sistema desigual, onde a distribuição e disponibilidade de energia são também questões de ordem social e econômica.

Países em desenvolvimento como África, China e Índia tinham em 2011 mais de 50% da energia residencial proveniente de biomassa, como a lenha, segundo o *World Energy Outlook* (2016). No entanto, esse valor tende a diminuir nos próximos anos. O uso tradicional da biomassa já não é mais utilizado em residências em países da União Europeia e Estados Unidos, e nesse contexto, há nesses países uma tendência de aumento no uso da biomassa de forma moderna para aquecer o ambiente e a água e para cozinhar.

A **Figura 4** apresenta um panorama dos países da África subsaariana, do Sudeste Asiático, da Índia, da China e de outros países em desenvolvimento com relação a dados da parcela da população que não tem acesso a eletricidade e acesso à energia para cocção.

**Figura 4:** Pessoas sem acesso à eletricidade e energia para cocção.



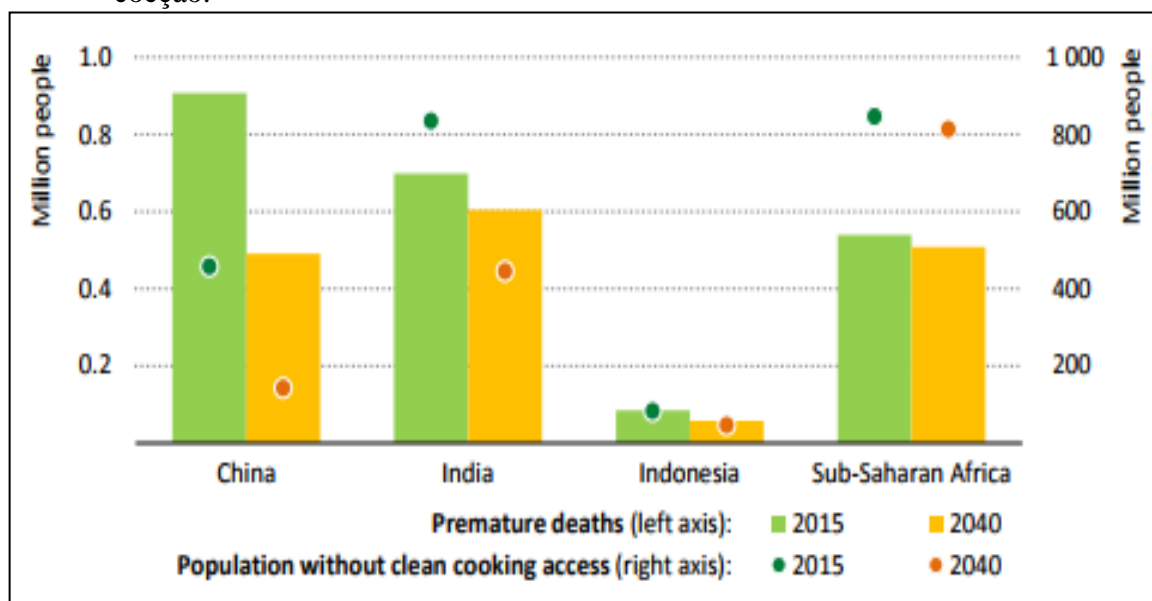
Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2017)

Dessa maneira, a população sem acesso à eletricidade e energia para uso residencial permanece dependente da biomassa, como a lenha e resíduos diversos. Isso evidencia a relação do uso tradicional da biomassa com o nível de desenvolvimento e pobreza das nações. Quanto maiores as disparidades socioeconômicas, maior é o uso tradicional da biomassa pela população.

Outra questão importante é a relação dos efeitos à saúde e à exposição de pessoas à queima da biomassa de forma tradicional, como lenha ou carvão vegetal, no interior das residências, pois os fogões e fornos tradicionais são pouco eficientes para cozinhar alimentos, emitindo gases e material particulado que são prejudiciais à saúde dos moradores. Essa informação, aliada à de que mais de 90% da população dos países mais pobres da África, Ásia e América Latina dependem de lenha, carvão vegetal e resíduos de cultivos como únicas fontes disponíveis para energia (*GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP*, 2014), faz com que a utilização de lenha e carvão vegetal em fogões e fornos ineficientes se torne um grande problema social mundial.

A **Figura 5** relaciona os efeitos na saúde da população dos países com os maiores usos de biomassa de forma tradicional, mostrando que, em um novo cenário (2040), a redução da parcela da população dependente do uso tradicional da biomassa para uso residencial diminuirá o número de mortes causadas pela poluição do ar, evidenciando o dano à saúde associado ao uso residencial de sistemas tradicionais de combustão da biomassa.

**Figura 5:** Mortes prematuras pela poluição do ar e população sem acesso à energia limpa para cocção.



Fonte: INTERNATIOANAL ENERGY AGENCY (2017)

Estima-se que, aproximadamente, 1,5 milhão de pessoas morrem por ano por doenças respiratórias relacionadas, direta ou indiretamente, com a inalação de fumaça (YAMAMOTO, 2009). O grupo mais afetado com a intoxicação e morte consequente da queima tradicional da biomassa são mulheres e crianças, já que estas, na maioria dos países dependentes desse tipo de combustível, são responsáveis pela preparação dos alimentos e passam a maior parte do tempo diretamente expostas à fumaça.

Além de preparar alimentos, as mulheres geralmente são responsáveis também pela procura, coleta e transporte da biomassa até as residências. Assim, outra questão que gera grande impacto na qualidade de vida das pessoas dependentes do uso tradicional da biomassa, é o tempo utilizado na catação e obtenção deste combustível. As enormes distâncias percorridas, o grande peso transportado e o enorme tempo desperdiçado faz com que haja uma “deterioração” das mulheres, tanto fisicamente quanto social e economicamente (WARIS; ANTAHAL, 2014).

O tempo total despendido nesta tarefa faz com que a possibilidade de outras atividades, como estudos, lazer, agricultura e outras, sejam menos priorizadas, contribuindo para a estagnação social dos grupos menos favorecidos. Desse modo, muitos estudos focados em países onde a forma tradicional da biomassa é amplamente utilizada, como em países da África, apontem a necessidade de sua substituição por combustíveis com queima mais limpa, como o GLP, pela sua alta eficiência de queima, baixos níveis de emissão e consequências a saúde e menor efeito sobre as mudanças climáticas (YAMAMOTO *et al.*, 2009).

Para todos os casos, tanto para a diminuição do nível de fumaça, quanto para um menor consumo de lenha (kg/h) e de tempo gasto para cozinhar, é essencial o uso de fogões mais eficientes. Nesse sentido, diversos estudos apontam a redução de mais de 50% no uso de lenha para uma mesma finalidade quando utilizado fogões eficientes em comparação aos tradicionais (AKPOOTU *et al.*, 2014; JETTER *et al.*, 2009; MACCARTY, 2008).

Alguns programas governamentais de implantação de fogões mais eficientes, como o caso da Índia, Nepal e Peru, apontaram uma ampla economia obtida pela utilização dessas tecnologias, promovendo incremento no aquecimento residencial, redução de custos e benefícios ambientais, percebendo-se também que a economia de consumo de combustível nesses países variou entre 27 e 66% (BIOENERGY CROPS, 2013).

Só no Paquistão, a estimativa da substituição de fogões tradicionais é de que haja uma economia de 14,5 milhões de toneladas de biomassa por ano. Além disso, se houvesse investimento e incentivo para utilização de biomassa de origem sustentável, os benefícios seriam ainda mais evidentes (BIOENERGY CROPS, 2013).

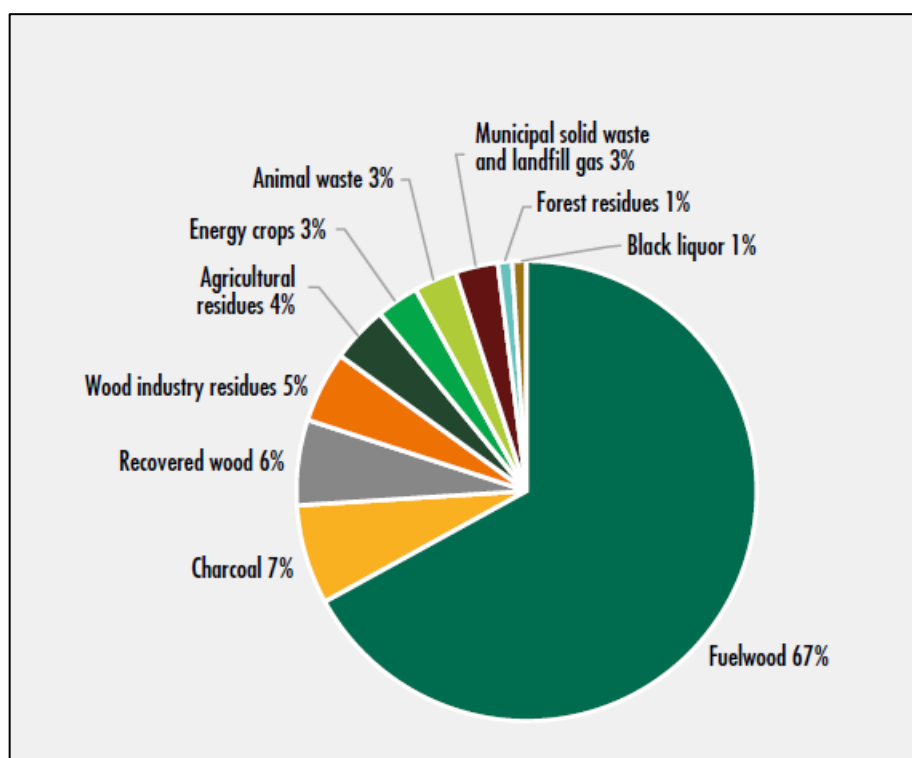
O uso de combustível sólido para serviços energéticos residenciais, principalmente àqueles sem tecnologia eficiente, suscitam uma série de problemas de ordem social e ambiental, dentre eles, questões de gênero, educacionais, poluição interna e emissões de gases de efeito estufa, dispêndio excessivo de tempo para cocção e coleta da lenha, ineficiência na combustão, baixa produtividade econômica, entre outros (BAQUIÉ; URPELAINEN, 2017; UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, 2005; CHEN *et al.*, 2016; CUTZ *et al.*, 2016).

De um modo geral, todos os países em desenvolvimento possuem o uso tradicional de biomassa, em maior ou menor escala, amparado majoritariamente nas populações em situação de pobreza ou extrema pobreza. Conhecer a real parcela de participação do uso tradicional da biomassa no mundo trará subsídios para estabelecer políticas públicas de desenvolvimento energético visando o acesso à energia para a ampla fatia da população que depende da lenha para cocção e aquecimento residencial, de combate ao desmatamento, de melhoria de saúde e, de apoio ao uso moderno da biomassa florestal de origem sustentável, contribuindo com benefícios sociais, ambientais e econômicos.

A **Figura 6** apresenta a estimativa elaborada pela *World Bioenergy Association* -WBA sobre a participação dos combustíveis derivados de madeira, os quais contribuem com mais de 87% de toda a energia da biomassa no mundo. Desse montante, 67 % advém da lenha, 7 % do carvão vegetal, 6 % de madeira reutilizada, 5% de resíduos da indústria madeireira, 1 % dos resíduos florestais e 1 % de licor negro oriundo da indústria de celulose e papel (WORLD BIOENERGY ASSOCIATION, 2017). A expressiva participação da lenha vem da biomassa,

considerada tradicional e originada de forma não sustentável, mostrando a necessidade de buscar políticas públicas e mecanismos mundiais para reverter essa participação transformando-a em biomassa de origem sustentável e com uso de tecnologias mais eficientes para a sua transformação em energia.

**Figura 6:** Contribuição de combustíveis derivados de madeira na energia da biomassa global



Fonte: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (2018)

A mesma Associação ressalta que, por conta da participação da biomassa florestal na oferta de energia no mundo, o setor florestal é considerado fundamental para o aumento do percentual de oferta na matriz global e seu respectivo desenvolvimento, com a ressalva que essa biomassa seja originada de forma sustentável.

### 3.3. USO DE BIOMASSA FLORESTAL NO BRASIL

No Brasil, como no mundo, o uso tradicional da biomassa ainda é expressivo. O acesso fácil à lenha em regiões rurais do país faz com que este energético seja um dos principais recursos, principalmente, para o uso residencial. Mesmo com o advento de outras fontes de energia como a eletricidade e o gás liquefeito de petróleo – (GLP), a lenha ainda se mostra

importante em determinadas regiões, seja pelo fácil acesso (a lenha pode ser catada nas proximidades da residência) ou pela economia gerada às famílias.

Ressalta-se que sobre o uso tradicional da biomassa, como a lenha, há de se atentar ao fato de que tal consumo em todos os setores está associado à disponibilidade de vegetação, muitas vezes oriundas de florestas nativas, o que pode suscitar em áreas de desmatamento as quais, por seu caráter ilegal, são difíceis de mensurar em dados oficiais (UHLIG, 2008).

A disponibilidade de dados sobre a oferta interna bruta de lenha, no caso do Brasil, apresenta divergências a depender da fonte, a qual também raramente indica a sua metodologia de pesquisa detalhada, implicando em dificuldades em se estabelecer um padrão quantitativo forneça base para reflexão sobre o uso da tradicional da biomassa no país. Assim, os dados de consumo sobre lenha e carvão vegetal são sempre estimados e obtidos no Balanço Energético Nacional.

No Brasil foram implantadas políticas públicas que tiveram como objetivo diminuir o uso tradicional da biomassa em residências e a incentivar a inserção do GLP como combustível para cocção. Programas como o Auxílio Gás e o Bolsa Família tiveram esse enfoque. Portanto, nota-se uma relação inversamente proporcional entre o consumo de lenha e o consumo de GLP no setor residencial. À medida que há mecanismos que possibilitem assegurar a substituição do uso tradicional da biomassa pelo uso aperfeiçoado ou moderno, com inserção de tecnologias mais eficientes ou por combustíveis modernos como o GLP, a tendência é de haja queda nas taxas de participação da lenha no consumo residencial (TRONCOSO; SILVA, 2017).

Além de promover melhorias sociais com a inserção do GLP como combustível a quem dependia da lenha de uso não sustentável, também é proporcionado benefícios ambientais, com a diminuição do desmatamento e emissões de gases de efeito estufa e melhorias à saúde da população, que não terá contato com gases e material particulado proveniente de fogões ineficientes e da queima da lenha.

Trabalhos como o de Sanches-Pereira *et al.* (2016) e o de Coelho *et al.* (2014) mostram que mesmo com o advento de políticas públicas voltadas para a inserção do GLP, a lenha ainda é uma importante fonte de combustível para cocção, devido aos custos baixos e muitas vezes até inexistentes e, que a depender da região, como as regiões Norte e Nordeste, onde o GLP tem um preço mais alto, o consumo de lenha será intensificado.

Em relação às florestas comerciais, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), referentes ao ano de 2021, mostram que a área de plantio com esse tipo de floresta foi da ordem de 9,5 milhões de hectares, sendo que as duas espécies principais desses plantios são o eucalipto e o pinus, com 7,3 milhões e 1,8 milhões de hectares, respectivamente.

Há ainda cerca de 400 mil hectares plantados com outras espécies de uso comercial, de forma que as florestas plantadas, com o objetivo de usos comerciais, somam cerca de 2% da área florestal do país.

Já a Indústria Brasileira de Árvores (2022), importante associação que congrega empresas do setor florestal brasileiro, apresentou números um pouco acima dos do IBGE, compreendendo um total de 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas no ano de 2021, 1,9% a mais do que o estimado para o ano de 2020 e, os principais produtos de áreas com florestas comerciais foram: produção de celulose e papel, produtores independentes, siderurgia a carvão vegetal, investidores financeiros, painéis de madeira e pisos laminados, produtos sólidos de madeira e outros. Além disso, é possível elencar outros usos de florestas tais como: serrarias, construção civil, indústria de móveis, energia e lenha. Ainda de acordo com o Indústria Brasileira de Árvores, os destaques do ano foram a produção de celulose, os painéis de madeira e os pisos laminados.

Dentre os principais usos da floresta no Brasil, parte do carvão vegetal ainda é oriundo de florestas nativas e, em 2021 o consumo de carvão vegetal no setor de Siderurgia, Ferro-gusa e aço chegou a 4,25 milhões de toneladas, sendo que as empresas associadas à Indústria Brasileira de Árvores contribuíram com 94% dessa produção oriunda de florestas plantadas e 6% de florestas nativas (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2022). Segundo a mesma Associação, a produção de carvão vegetal a partir de florestas nativas vem diminuindo ano a ano em decorrência da maior fiscalização ambiental e de legislação específica, como no caso do estado de Minas Gerais. Segundo Anater (2022), a origem da matéria-prima, entre plantada e nativa, é diferenciada entre as regiões brasileiras, sendo que as regiões Norte e Nordeste são mais dependentes de fontes nativas e, as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam maior produção de carvão vegetal de origem plantada.

Além do carvão vegetal, a lenha é um importante insumo para o setor industrial (produção de cerâmica vermelha, bebidas, alimentos e outros), para o uso residencial e para o uso rural voltado para fins térmicos. Segundo Escobar (2016) no ano de 2015 foram consumidos quase 80 milhões de toneladas de lenha no Brasil, sendo que o setor de carvão vegetal e o industrial consumiram cerca de 32% cada, já o setor residencial consumiu 25% e o rural (para fins térmicos) consumiu 11% da lenha. O autor ainda compara com dados de 2010 e, demonstra que o consumo de lenha no país vem caindo, já que em 2010 foram consumidos quase 83 milhões de toneladas de lenha.

O mesmo autor ainda ressalta que 40% da lenha é originada de florestas plantadas e, que 60% seria de florestas nativas. Assim, é importante compreender que há um alto consumo de



lenha advinda de floresta nativa no país e direcionada para diferentes usos e que pode ser oriundo de planos de manejo florestal sustentável ou por meio de outros tipos de autorização de órgãos ambientais, a depender do bioma que originou a lenha. No entanto, torna-se necessário compreender quando e quanto é originado de desmatamento ilegal e qual é a parcela de lenha utilizada de forma ineficiente para uso residencial ou outros. Porém, o que se tem percebido é que a interpretação de tal informação pode ser prejudicada por conta da divergência dos dados disponibilizados oficialmente no país, gerando dúvidas em relação à procedência dessa matéria-prima.

Num país com as dimensões do Brasil a lenha tem um importante papel como recurso energético, tanto para a produção de insumos, quanto para a geração de energia e para cocção. A importância da lenha é ressaltada pela sua participação no consumo energético brasileiro que no ano de 2021 foi de  $18.288 \times 10^3$  tep 7 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). No ano anterior, a participação foi de  $17.723 \times 10^3$  tep. De acordo com Silva *et al.* (2022), no Brasil, o cenário econômico e a pandemia de Covid-19, ocorrida nos últimos anos, aumentaram o uso de lenha em substituição ao GLP para uso residencial. Já a participação da biomassa (inclui lenha, carvão vegetal e derivados da cana-de-açúcar) na oferta interna de energia em 2021 foi de 25,1%, conforme Empresa de Pesquisa Energética (2022).

Assim, ressalta-se que o uso de lenha no país vai muito além da compreensão dos dados disponibilizados, sendo necessário entender a dinâmica florestal em um país de grandes dimensões. A lenha é insumo para vários processos, como a produção de carvão vegetal e usos industrial e residencial. Com isso, é necessário compreender que não se requer grandes especificações técnicas acerca desse material, cuja origem pode ser de florestas plantadas, a exemplo do Eucalipto, nativas ou advinda de forma não sustentável por atividades como o desmatamento. Sob essa ótica, há uma carência de dados oficiais. Anater (2022), mencionou em seu trabalho, que a falta de rastreabilidade no setor florestal faz com que não seja possível garantir a origem da lenha, trazendo muitas incertezas para as estatísticas governamentais e, que o uso desse insumo está relacionado às especificidades de cada região do Brasil, possuindo baixa qualidade, em especial para o uso residencial.

As grandes empresas do setor siderúrgico, devido à necessidade de carvão vegetal mais eficiente e das obrigações legais investem em plantios de florestas e em tecnologias de produção de carvão vegetal, visando obter um insumo mais eficiente e com características adequadas para ser utilizado no alto forno na produção de ferro-gusa e outros materiais.

A biomassa florestal aparece como fonte de lenha e carvão vegetal na matriz energética, responsável por 8,7 % de oferta interna de energia no ano de 2021 (BEN, 2022), sendo citada

também quanto ao uso da lixívia ou licor negro, no aproveitamento para cogeração de eletricidade nas empresas de celulose e papel, com uma produção equivalente a 35372 10<sup>3</sup> t. Em relação a oferta de renováveis para o ano de 2021, esse valor foi da ordem de 44,8 %, havendo participação de lenha e carvão vegetal (8,7%), derivados da cana-de-açúcar (16,4%), hidrelétricas (11 %) e Outras Renováveis (8,7). Complementarmente, a fatia de não renováveis na matriz energética brasileira aparece com 55,2 % para o ano de 2021 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022).

As indústrias do setor florestal, responsáveis pelo plantio de eucalipto ou pinus, vêm diversificando o seu uso, agregando o uso energético, com florestas dedicadas ou utilizando os resíduos para queima ou para produção de briquetes ou *pellets*, por exemplo. Nas diferentes cadeias produtivas de base florestal são gerados resíduos, como é observado na indústria de papel e celulose, onde o licor negro, considerado um resíduo no passado, hoje tem sido queimado nas caldeiras, produzindo a energia necessária ao processo e exportando para a rede o excesso da energia gerada. Os resíduos de serrarias (maravalhas, pó de serra e costaneiras) têm sido utilizados na fabricação de briquetes e *pellets*, bem como no aproveitamento energético para uso em secagem de madeira serrada e geração de energia para o funcionamento da serraria e, a depender do porte da serraria, pode haver exportação do excedente para a rede.

Segundo Cortez *et al.* (2008) não é simples obter estatísticas precisas da geração dos resíduos nas cadeias de base florestal, já que o volume e os tipos de pedaços e/ou fragmentos gerados são dependentes de vários fatores, dos quais se destacam o diâmetro das toras e o uso final das peças serradas. Ainda de acordo com esse autor, os resíduos gerados em uma cadeia produtiva de serrados, por exemplo, constituem-se em média de 7 % de casca, 10 % de serragem e 28 % de pedaços, isso sem considerar as perdas na extração da madeira.

No Estado de São Paulo, por exemplo, há um mercado de aproveitamento dos resíduos gerados na cadeia de base florestal, comercializando-os como cavacos. Empresas levam caçambas até o local onde se encontra a madeira para retirar e, depois em seu pátio passam a madeira em um picador, transformando-a em cavacos para venda. Muitas vezes essa atividade também é realizada com os resíduos de podas advindos da arborização urbana. Nesses casos, os cavacos podem ter diferentes características, pois são oriundos de diferentes espécies com diferentes densidades, teores de umidade, cinzas e poder calorífico.

O Governo do Estado de São Paulo possui também uma iniciativa em que pizzarias, churrascarias e padarias que usam lenha como combustível energético, ao pagarem uma taxa de reposição florestal receberão o Selo Madeira Legal, que ficará afixado nos comércios (PROGRAMA MADEIRA LEGAL, 2009). Outras iniciativas como o “Acordo Ambiental São

Paulo” visam a redução voluntária de emissão de gases de efeito estufa e incentivo às ações de sustentabilidade em todo estado (SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021).

Aliado às áreas degradadas em que se poderiam plantar florestas dedicadas ao uso energético e ao potencial da geração de resíduos de biomassa na cadeia produtiva de base florestal, tem-se as características da biomassa e o seu potencial para uso em tecnologias termoquímicas, substituindo combustíveis fósseis. De acordo com Kamm *et al.* (2006), diferentes tipos de biomassa podem ser considerados como culturas energéticas e resíduos de madeira, sendo compreendidos como uma matéria-prima similar ao petróleo, com diferentes proporções de carbono, hidrogênio e nitrogênio, podendo agregar à indústria de base florestal o conceito de biorrefinaria, transformando a biomassa florestal em diferentes compostos e contribuindo para a bioeconomia circular.

#### 3.4. A PRODUÇÃO DE MADEIRA NA AMAZÔNIA LEGAL E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS

Os dados mostram que não houve grandes flutuações na produção de madeira em tora na Amazônia Legal entre o início dos anos de 2010 e o final dessa década, já que a produção no ano de 2010 atingiu o volume de 10,8 milhões de m<sup>3</sup> e finalizou a década com 11,28 milhões de m<sup>3</sup> de toras de madeira (SANTOS *et al.*, 2021). É importante mencionar que a atividade de extração de madeira acontece principalmente nos estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia e, que até meados da década de 2010, o Pará era o principal estado produtor de madeira, sendo ultrapassado pelo Mato Grosso no final da década. Em 2019 o estado paraense produziu 3,76 milhões de m<sup>3</sup>, segundo a pesquisa do IBGE.

Então, se for considerado que toda a produção de madeira extraída possa ter passado por algum tipo de beneficiamento ainda em território da Amazônia Legal, estima-se que cerca de 50% tenham se tornado resíduo, representando aproximadamente 5,64 milhões de m<sup>3</sup>. No estado do Pará, 1,88 milhões de m<sup>3</sup> poderiam ter se transformado em resíduos no ano de 2019, demonstrando o enorme potencial de reaproveitamento dessa matéria-prima em novos produtos, como pequenos objetos de madeira (utensílios de cozinha, brinquedos e outros pequenos objetos) ou ainda gerando energia em comunidades isoladas na região.

Como já informado anteriormente, a região da Amazônia Legal gera cerca de 26 % da energia elétrica do país, a partir das hidrelétricas localizadas em seu território. Em contrapartida, cerca de 1 milhão de habitantes não possuem energia elétrica em suas casas, recebendo

fornecimento de energia via gerador em alguns momentos do dia (SUZUKI, 2022). Assim, os resíduos de origem florestal poderiam ser uma importante fonte de energia para a população que ainda não tem acesso à energia e também para aqueles que não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), ficando na dependência de usinas termelétricas a diesel, responsáveis pela emissão de quantidades elevadas de gases de efeito estufa.

A extração de madeira na Amazônia Legal é regida por uma ampla gama de leis e regulamentos federais e estaduais e, sua extração deve ser autorizada pelos órgãos ambientais competentes. De acordo com o Programa Madeira Legal, para que a extração legalizada ocorra, o órgão ambiental deve autorizar a extração emitindo a Autorização de Exploração (AUTEX) para os seguintes casos:

- Autorização para Supressão da Vegetação;
- Autorização para desmate para Uso Alternativo do Solo e;
- Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS.

Além disso, deverá também compor a documentação de autorização, os documentos de licença de transporte e armazenamento, sendo um deles o Documento de Origem Florestal (DOF), acompanhado da Nota Fiscal correspondente.

É importante mencionar que, pela legislação vigente, imóveis situados na Amazônia Legal devem ter 80% de reserva legal, ficando 20% passível para outros usos, havendo, nessa região, a possibilidade de aumentar as áreas destinados para outros usos e diminuir a área de reserva legal, a depender do entendimento e critérios do órgão ambiental (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2023).

É importante destacar ainda que dentre as opções para extração de madeira no bioma amazônico, há o consenso entre os pesquisadores de que o Plano de Manejo Florestal Sustentável é o que proporciona maior sustentabilidade ao sistema ambiental e que esse deveria ser amplamente incentivado. De maneira simplista, o Plano de Manejo Florestal Sustentável é o documento que detalha e define como a floresta será explorada de forma sustentável.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2023), o Manejo Florestal Sustentável é a forma de administrar a floresta com geração de benefícios ambientais, econômicos e sociais, contribuindo com a conservação do ecossistema e com o aproveitamento racional dos ativos florestais, que são a extração de produtos madeireiros e não-madeireiros, serviços ecossistêmicos, manejo da fauna silvestre, ecoturismo, dentre outros, promovendo o desenvolvimento sustentável.

A elaboração, a autorização e todas as etapas desenvolvidas num Plano de Manejo Florestal Sustentável são regidas por um arcabouço de leis e regras, a saber: Lei Complementar

nº 140/11 (BRASIL, 2011); Lei nº 11.284/2006 (BRASIL, 2006); Lei nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012); Decreto Federal nº 5.975/2006 (BRASIL, 2006) Instrução Normativa MMA nº 5/2006 (BRASIL, 2006b); Instrução Normativa MMA nº 4/2006 (BRASIL, 2006c); Instrução Normativa MMA nº 1/2009 (BRASIL, 2009) e, o seu marco legal inicial foi dado na Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, (BRASIL, 1965) que instituiu o Código Florestal.

O Decreto 5.975/2006 define o Plano de Manejo Florestal Sustentável –(PMFS) como *“o documento técnico básico que contém as diretrizes e procedimentos que o empreendimento assumirá para a administração da floresta”* (BRASIL, 2006a). Nesse documento todos os parâmetros de administração e gerenciamento da atividade florestal estará detalhada, incluindo a caracterização dos meios físico e biótico, informações edafoclimáticas, delimitação da propriedade, APPs e todas as informações do inventário florestal da área, incluindo o planejamento da colheita das árvores e como elas serão retiradas da floresta (SARTORI, 2012).

Inclusive os Planos de Manejo Florestal Sustentável também informam como será a gestão e reaproveitamento dos resíduos gerados durante a colheita das árvores comerciais, pois na etapa florestal também é gerado um grande volume de resíduos. Os PMFS já descrevem como será o reaproveitamento, indicando se produzirão carvão vegetal, objetos de decoração, estacas e mourões e energia, sendo regulamentados pela Resolução CONAMA 406 de 2009 que em seu artigo 8º define: *“é permitido a utilização de resíduos tais como galhos e sapopemas, provenientes das árvores exploradas”*.

Um exemplo de reaproveitamento de resíduos da colheita da etapa florestal acontece na Floresta Nacional de Tapajós em parceria com a Cooperativa Mista da Flona Tapajós - Coomflona que transforma os resíduos de galhos da colheita das árvores em móveis e outros artefatos em uma movelaria instalada na referida FLONA (CARVALHO *et al.*, 2015).

A etapa florestal gera uma grande quantidade de resíduos durante a colheita das árvores, mas quantificar esses resíduos para estimar o potencial de uso é extremamente complexo e, dependeria de fazer uma ampla pesquisa nos Planos de Manejo em desenvolvimento para levantar informações sobre a sua gestão, entendendo-se que o seu reaproveitamento é um grande desafio, porque envolve a logística para retirar da floresta e o transporte até centrais de reaproveitamento. Soluções como a encontrada pela Flona Tapajós e a Coomflona que fazem o aproveitamento dentro da floresta é um exemplo a ser disseminado e incentivado.

A gestão da Flona Tapajós para extração de madeira, a partir do manejo florestal sustentável é um exemplo de concessão florestal de florestas públicas do Governo Federal para terceiros. Nesse tipo de concessão é realizado editais de concorrência pública em que empresas concessionárias podem ser selecionadas apresentando proposta técnica e comercial, visando o

manejo florestal sustentável da área. O Serviço Florestal Brasileiro é a instituição responsável pelo acompanhamento da execução dos projetos. A Política de Concessões Florestais é regida pela Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei 11284 de 2006d) e, segundo o Serviço Florestal Brasileiro, tal política permite aos Governos das esferas federal, estadual e municipal fazerem a correta gestão das áreas públicas, combatendo atividades ilegais e promovendo benefícios sociais e ambientais, bem como o desenvolvimento econômico sustentável no longo prazo. Atualmente, o Serviço Florestal Brasileiro possui contratos para concessão florestal em 6 (seis) Florestas Nacionais, localizadas nos estados do Pará e Rondônia e, até o momento, foram disponibilizados cerca de 1 milhão de hectares de florestas que vão produzir madeira e, outros produtos por meio de Planos de Manejos Florestal Sustentável por dez empresas durante 40 anos.

Uma forma de atestar que as boas práticas ambientais, sociais e econômicas estão realmente sendo executadas nos Planos de Manejo Florestal Sustentável é por meio da obtenção da certificação que atestará a origem da madeira e, passará por fiscalizações anuais, denominadas auditorias, que visam monitorar se está tudo dentro dos padrões especificados pelas certificadoras e atendendo a legislação vigente do país.

A Certificação Florestal é um processo voluntário que visa garantir que os produtos florestais são provenientes do manejo sustentável da floresta e atendem aos três pilares da sustentabilidade:

- produto ecologicamente correto;
- socialmente justo e;
- economicamente viável.

A certificação florestal é um processo que atesta o desenvolvimento sustentável e a gestão ambiental e pode seguir sistemas nacionais ou internacionais. Os principais sistemas internacionais são o FSC (*Forest Stewardship Council*) e o PEFC (*Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes*), que reconhece o Programa Brasileiro de Certificação Florestal – CERFLOR (VALDIONES et al, 2020).

O FSC (*Forest Stewardship Council*) é uma organização internacional não governamental, sem fins lucrativos e que estabelece os Princípios e Critérios (P & C) para a certificação por meio de um processo participativo, envolvendo diversas instituições, como entidades ambientalistas, pesquisadores, produtores de madeira, comunidades indígenas, populações florestais e indústrias. Os Princípios são as regras, os elementos essenciais do manejo florestal ambientalmente adequado, socialmente benéfico e economicamente viável. E

os Critérios fornecem os meios para julgar se um Princípio foi atendido, sendo que os princípios e critérios (P&C) são imutáveis ao redor do mundo.

Tipos de certificação do FSC:

- Manejo florestal: aplicada às atividades desenvolvidas na floresta propriamente dita e que seguem os padrões “Terra Firme na Amazônia”, “Harmonizado Plantações” e “Manejo Florestal de baixo impacto voltado para pequenos produtores ou manejo comunitário” (*FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022*);
- Cadeia de custódia: refere-se à rastreabilidade desde a produção da matéria prima das floresta até o consumidor final (*SANQUETTA; MILDEMBERG; DIAS, 2022*);
- Madeira controlada: certificação específica do FSC, voltado a materiais que não são certificados, mas que possuem origem em fontes aceitáveis e que podem ser misturados com material certificado pelo FSC em produtos com o rótulo 'FSC Misto' (*FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022*).

Já o PEFC (*Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes*) é uma organização independente, não governamental e sem fins lucrativos que promove a sustentabilidade do manejo florestal. Os padrões e guias internacionais do PEFC são desenvolvidos por meio de um processo detalhado e rigoroso com o envolvimento de diversos *stakeholders*, antes que possam ser aprovados e implementados.

A implantação da certificação das atividades possui um custo caro para os empreendedores e isso pode ser comprovado pela baixa adesão a certificação, pois atualmente entre 3 a 5 milhões de hectares são certificados na região da Amazônia Legal pelo FSC (*IMAFLOA, 2022*).

Os benefícios que a certificação florestal traz para os produtos florestais brasileiros são inúmeros, inclusive abrem portas para o comércio internacional, já que muitos países exigem o certificado de origem do produto florestal e também beneficiam as comunidades onde a extração de madeira acontece, além de desmitificar o processo de manejo florestal sustentável e colaborar com a destinação correta de resíduos.

### 3.5. INDÚSTRIA MADEIREIRA NA AMAZÔNIA LEGAL E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As serrarias, além de beneficiarem a madeira transformando as toras, pelo processamento do desdobro, em diversos produtos como tábuas, caibros, vigas e vigotes, também geram uma grande quantidade de resíduos, que, a depender da espécie e das

características da madeira, apresentam grande variação, podendo ultrapassar 65% em volume de resíduos (BRAZ *et al.*, 2014; DUTRA;NASCIMENTO, 2005) divididos em diversos tipos, a exemplo da serragem, maravalha, costaneiras, aparas e cascas.

É importante destacar a relevância da atividade econômica da indústria da madeira na Amazônia Legal a partir do beneficiamento de toras de madeira em serrarias, que também geram grande volume de resíduos. Levantamentos de dados realizados no final dos anos 90 mostravam que o consumo de toras de madeira era em torno de 28 milhões de m<sup>3</sup> com cerca de 2.500 empreendimentos entre serrarias, laminadoras e fábricas de compensados, organizados em mais ou menos 72 polos madeireiros (LENTINI *et al.*, 2003 apud VALDIONES, 2022).

Em novo levantamento realizado no ano de 2019, foi possível observar a migração da atividade madeireira para outras regiões da Amazônia, como na região Oeste do Pará (região onde está localizada a Serraria, objeto do estudo de caso desse trabalho), sul do Amazonas, noroeste do Mato Grosso e no Acre, sendo demonstrado também uma queda no consumo de madeira em tora, que foi inferior a 10 milhões de m<sup>3</sup> no ano de 2018 (LENTINI *et al.*, 2019 apud VALDIONES, 2022). Essa diminuição de consumo de madeira pode estar ligada ao desenvolvimento do manejo florestal sustentável para extração de madeira na Amazônia e à legislação ambiental (VALDIONES, 2022).

Porém, mesmo com a diminuição do consumo de madeira em tora, é notório que pelo menos 50% do volume de madeira beneficiada em serrarias se transforma em resíduos (CONAMA, 2018) e, assim, quase 5 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos gerados no ano de 2018 tem grande potencial para geração de energia. Com isso, a biomassa florestal aparece como uma grande alternativa aos combustíveis de origem fóssil para aumentar a porcentagem de energia de origem renovável na matriz energética brasileira, em especial na Amazônia Legal.

A biomassa florestal apresenta baixos teores de enxofre e de cinzas, o que colabora com a melhor eficiência em processos de queima e outras características, como densidade, teor de umidade e poder calorífico, as quais são importantes para definir qual a melhor tecnologia para o aproveitamento energético (BRAND, 2010). A exemplo, citam-se as questões como a baixa densidade energética e o teor de umidade, que influenciam nos custos de logística e na qualidade da combustão dessa matéria-prima (VIDAL; DA HORA, 2011).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2023), a Amazônia Legal hoje possui 36 empreendimentos em operação, a partir de algum resíduo ligado ao setor florestal, totalizando 716,29 MW de geração de energia. São 27 empreendimentos que geram energia a partir de resíduos florestais com potência outorgada de 240,81 MW representando 33,62 % da geração, 02 empreendimentos, a partir do licor negro (resíduo da produção de celulose e papel)



com 309,84 MW ou 43,26 % da potência outorgada, 01 empreendimento a carvão vegetal com 12,20 MW ou 1,70 % da potência outorgada, 01 empreendimento a gás de alto forno com 2,40 MW ou 0,34 % da potência outorgada e 05 empreendimentos, a partir de lenha com 151,04 MW ou 21,09 % da potência outorgada (**Quadro 01**).

**Quadro 01:** Empreendimentos de geração de energia em operação, a partir de biomassa florestal ou algum resíduo do setor florestal instalado na Amazônia Legal

Estados	Resíduos Florestais		Licor negro		Carvão Vegetal		Gás de Alto Forno		Lenha	
	Quantidade	Potência (MW)	Quantidade	Potência (MW)	Quantidade	Potência (MW)	Quantidade	Potência (MW)	Quantidade	Potência (MW)
Acre	1	1,50								
Amazonas	2	9,03								
Amapá										
Maranhão			1	254,84	1	12,20	1	2,40		
Mato Grosso	10	133,98							4	139,54
Pará	8	27,51	1	55,00						
Rondônia	1	24,00								
Roraima	5	44,80								
Tocantins									1	11,50
Totais	27	240,81	2	309,84	1	12,20	1	2,40	5	151,04

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2023)

Já o Estado do Pará tem em operação, atualmente, 14 empreendimentos a partir de biomassa (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023), com destaque para o setor florestal com 09 empreendimentos, 01 a partir de licor negro (empresa Jari Celulose no município de Almeirim) e 08 a partir de resíduos florestais, totalizando 82,51 MW de potência, o que representa 75,53 % da geração a partir de combustíveis ligados a biomassa, conforme **Quadro 02**. Ressalta-se que nenhum dos empreendimentos em operação no Estado do Pará estão localizados no município de Santarém.

**Quadro 02:** Empreendimentos de geração de energia em operação, a partir de biomassa instalado no Estado do Pará.

Tipo de Combustível	Quantidade	Potência (MW)
Licor Negro	1	55,00
Resíduos Florestais	8	27,51
Bagaço de Cana-de-açúcar	2	21,25
Óleos Vegetais	2	4,35
Biogás (Resíduos Animais)	1	1,13
Total	14	109,24

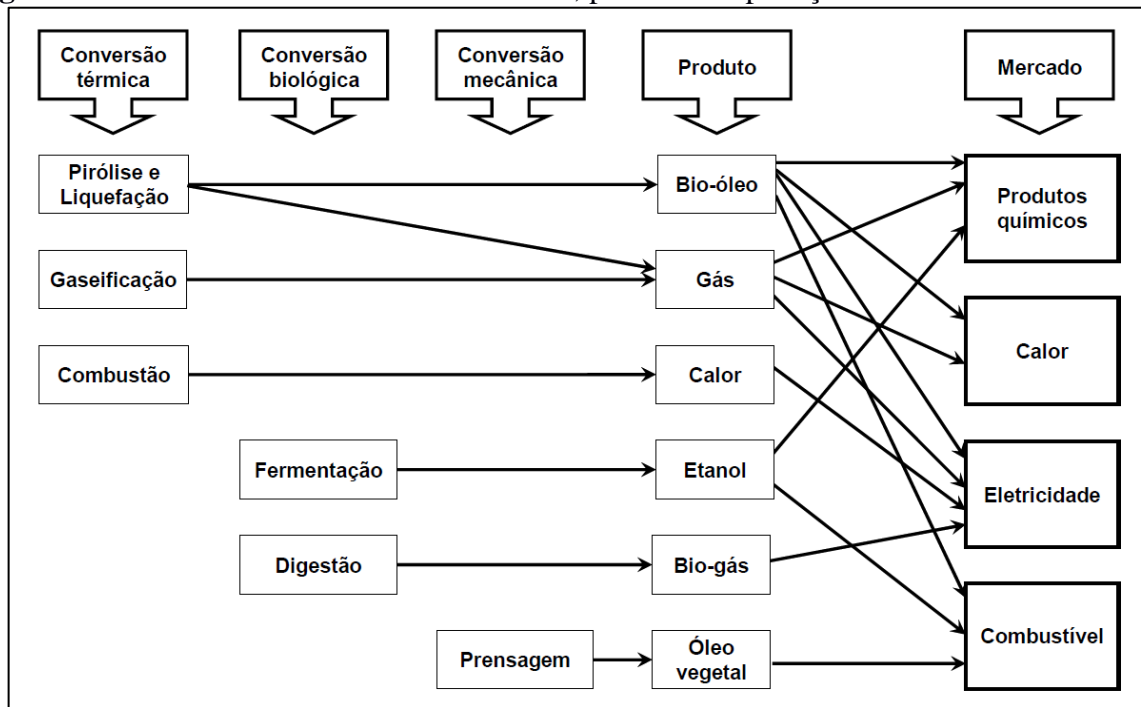
Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2023)

A destinação dos resíduos gerados em serrarias e outros empreendimentos florestais devem ter uma correta e adequada destinação, como preconizado na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010, podendo ser o aproveitamento energético, buscando tecnologias já em escala comercial, eficientes, de fácil operação e com custo acessível.

#### **4. TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA**

A biomassa florestal pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, que poderão ser utilizados para gerar energia em diferentes formas como calor, vapor, eletricidade e biocombustíveis. Essa conversão é feita por meio de processos termoquímicos, bioquímicos e mecânicos. Na **Figura 7** são apresentados os processos de conversão e seus possíveis produtos.

Combustão, gaseificação, pirólise e liquefação são exemplos de processos termoquímicos. Dentre os processos bioquímicos tem-se a fermentação, para converter açúcar em etanol, e a digestão anaeróbica para produção de biogás. Os processos mecânicos não são exatamente um processo de conversão, uma vez que eles não alteram o estado físico da biomassa. Exemplos de processos mecânicos são a compactação de resíduos na forma de briquetes ou *pellets*, moagem ou picagem de biomassa e extração mecânica do óleo em filtro prensa (BRIDGWATER, 2006).

**Figura 7:** Processos de conversão de biomassa, produtos e aplicações

Fonte: Adaptado de Bridgwater, 2006, apud Almeida, 2008

#### 4.1. CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

A carbonização é um processo em que a madeira é submetida a aquecimento entre 450°C e 550°C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de oxigênio, durante o qual são liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, gerando, principalmente, o alcatrão e o carvão vegetal (PINHEIRO *et al.*, 2006 apud SANTOS, 2017).

De acordo com Santos (2010) o objetivo da carbonização é aumentar o teor de carbono na massa resultante do processo. Assim, o carvão vegetal e a ocorrência desse processo estão intimamente relacionados à composição química dos três principais componentes da madeira, a celulose, a hemicelulose e a lignina, além de sofrer influência das suas características físicas e anatômicas.

A carbonização da madeira ocorrerá em temperaturas diferentes em cada componente, ou seja, as hemiceluloses se degradam primeiro, sob temperaturas que variam entre 200° e 260°C, seguidas da celulose entre 240°- 350°C e da lignina entre 280°-500°C.

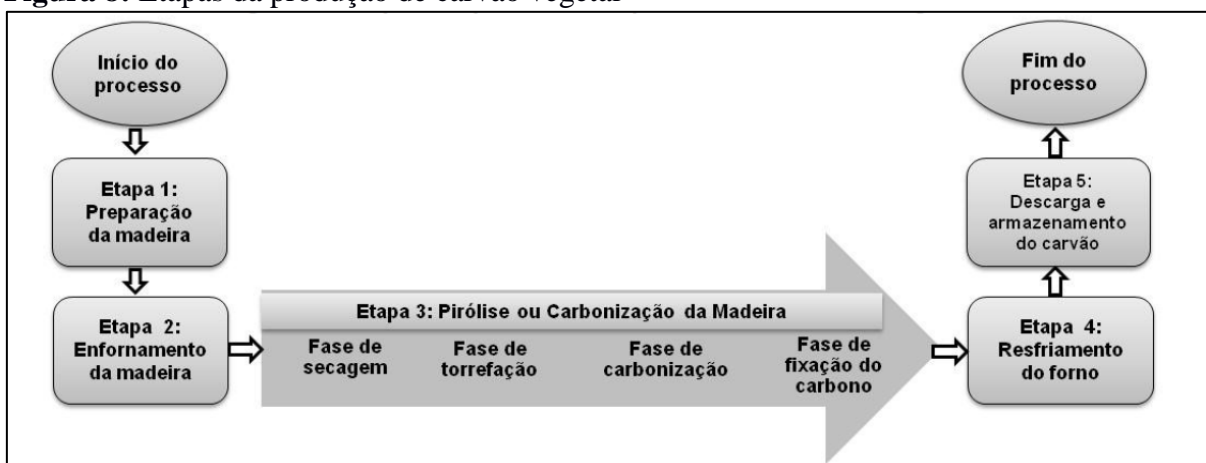
A reação de carbonização da madeira consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto. Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%. Depois de carbonizada, esses teores passam, em média, no carvão vegetal, para 82% e 13,7%. O carvão

retém 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados (SANTOS, 2010).

Alguns fatores afetam a carbonização no que se refere ao rendimento e à qualidade do carvão produzido, que reflete, especialmente, no caso da qualidade do carvão, no teor de carbono fixo presente no mesmo. Dentre esses fatores destacam-se a temperatura final de carbonização, a taxa de aquecimento, a pressão e o tamanho da peça de madeira a ser carbonizada. De modo geral, quanto maior a temperatura final de carbonização, maior o teor de carbono fixo e menor o rendimento gravimétrico em carvão e no teor de materiais voláteis (SANTOS, 2010).

Para a produção de carvão vegetal existem diversas rotas tecnológicas no Brasil, desde fornos conhecidos como “rabo quentes” que apresentam baixíssima eficiência de conversão, fornos de alvenaria retangulares e fornos metálicos do tipo container que apresentam melhor eficiência de conversão. A definição da escolha da rota tecnológica para produção de carvão vegetal pode estar atrelada às questões de recursos para investimento, tipo de matéria-prima (plantio de florestas dedicadas; próprias ou de terceiros) e logística (distância da planta de carbonização até a matéria-prima e do carvão vegetal até o consumidor final). As rotas tecnológicas de produção de carvão vegetal em geral seguem o modelo proposto por Santos (2017) na **Figura 8**.

**Figura 8:** Etapas da produção de carvão vegetal



Fonte: Santos, 2017

## 4.2. COMPACTAÇÃO DE BIOMASSA FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES E *PELLETS*

A compactação de resíduos de madeira ou outras biomassas podem produzir briquetes ou *pellets* que são combustíveis granulados, obtidos a partir da compactação da biomassa. O que difere os briquetes dos *pellets* são os tamanhos, o primeiro pode ter diâmetro entre 50 e 100 mm e comprimento de 250 a 400 mm e, o segundo pode ter diâmetro entre 6 e 16 mm e comprimento entre 25 e 30 mm (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2012)

A principal aplicação dos briquetes e *pellets* está na geração de energia térmica para o aquecimento de residências ou para utilização em processos industriais. A compactação visando a produção de briquetes e *pellets* promove melhorias significativas na biomassa, tornando-a um combustível mais homogêneo, reduzindo o seu volume e, conseqüentemente, otimizando seu armazenamento e transporte (SHAW *et al.*, 2009; WARAJANONT; SOPONPONGPIPAT, 2013).

De acordo com Escobar (2016) o *pellets* possui alta densidade e valor energético agregado (PCI acima de 4600 kcal/kg), baixa umidade (entre 7 e 10%), diâmetro entre 6 a 18 mm e, ainda possui facilidade de manuseio, transporte e armazenamento, trazendo vantagens à logística.

Os principais aspectos a serem considerados para viabilização do processo produtivo de *pellets* são o teor de umidade, tamanho e forma das partículas, a densidade da biomassa a ser utilizada, a pressão de compactação e temperatura do processo (TUMULURU *et al.*, 2011). Segundo Escobar (2016), outro parâmetro a ser observado são as altas taxas de cloro presentes na biomassa oriunda da espécie eucalipto, que durante o processo de peletização, podem formar dioxinas.

O processo de produção de *pellets* é considerado simples e, após a biomassa estar triturada em granulometria adequada e seca, será transformada em pó e, posteriormente, será comprimida (prensada) para se obter a forma final. Em termos de rendimento, de 6 a 8 m<sup>3</sup> de serragem ou cavacos de madeira, depois de secos, processados e prensados, vão gerar 1 m<sup>3</sup> de *pellets* e, o resultado será um composto 100% natural e de elevado poder calorífico (QUENO, 2015).

Segundo Quirino e Brito (1991), a produção de briquetes é considerada um processo de reconstrução ou reconsolidação de material particulado, aplicando temperatura e pressão à uma massa de partículas, podendo conter ou não ligantes. No caso de biomassa florestal, a adição de

ligantes não é necessária, pois, esse tipo de biomassa possui lignina, que atua como um ligante entre as partículas e ainda cria uma camada que protege o briquete das variações de umidade (FURTADO *et al.*, 2010). Os mesmos autores mencionam que características como poder calorífico superior (PCS), densidade e resistência à compressão são importantes para o uso do briquete como combustível.

#### 4.3. PIRÓLISE RÁPIDA DE BIOMASSA

A pirólise rápida é um processo termoquímico no qual a biomassa é fragmentada com o uso de calor numa atmosfera com ausência de ar para a produção de líquido, gases combustíveis e sólidos.

De acordo com Bridgwater (2012), as principais características do processo de pirólise rápida são:

- Altas taxas de aquecimento e de transferência de calor, requerendo uma biomassa finamente moída;
- Temperatura de reação controlada em torno de 500°C;
- Baixo tempo de residência dos vapores, tipicamente menor que 2 segundos;
- Resfriamento rápido dos vapores.

O processo de pirólise rápida compreende: a) etapa de secagem da biomassa, tipicamente para menos de 10% de umidade, para minimizar a quantidade de água no produto líquido; b) moagem da biomassa, para obter tamanho de partículas suficientemente pequeno, entre 6 e 10mm; c) reação de pirólise; d) separação do carvão dos gases e vapores e condensação rápida dos vapores e, e) coleta do bio-óleo.

Em média os rendimentos do processo de pirólise rápida são 75% de líquidos, 12% de finos de carvão e 13% de gases.

O principal produto da pirólise rápida é o bio-óleo (também referenciado como "alcatrão"), um líquido preto ou marrom, dependendo da composição química da biomassa que o originou, que apresenta poder calorífico com cerca de 50% do petróleo (MULLEN; BOATENG, 2008) e densidade de até 1200 kg/m<sup>3</sup>. Urtado *et al.* (2015) encontraram o poder calorífico superior de 22,077 MJ/kg e poder calorífico inferior de 19,419 MJ/kg para bio-óleo de cambará (*Qualea sp.*).

O bio-óleo pode ser melhorado transformando-se em produtos secundários utilizados como combustíveis ou produtos químicos e pode ser queimado, gerando calor em caldeiras ou

eletricidade por meio de turbinas e motores. Para a otimização das aplicações do bio-óleo é necessário pesquisas que visem a melhoria da sua qualidade.

As etapas de secagem e de moagem são muito importantes porque delas dependem o rendimento que o bio-óleo apresentará e, por isso merecem atenção.

Um dos componentes mais importantes do equipamento de pirólise rápida é o reator e há uma grande variedade de configurações de reatores sendo pesquisados, que mostram diversidade e inovação no cumprimento dos requisitos básicos do processo de pirólise rápida. Segundo Bridgwater (2012) o melhor reator ainda não está estabelecido, sendo que a maioria apresenta rendimentos líquidos entre 65 e 75%. As características essenciais de um reator de pirólise rápida, visando maximizar o rendimento do bio-óleo (principal produto) são as elevadas taxas de aquecimento, os curtos tempos de residência da biomassa, as temperaturas moderadas do reator (500-550°C) e o resfriamento rápido dos vapores de pirólise.

As configurações de reatores que atendem a esses requisitos são: leito fluidizado borbulhante, leito fluidizado circulante e cone rotativo.

A empresa *Biomass Technology Group* (BTG) da Holanda, desenvolvedora da tecnologia de pirólise rápida de cone rotativo, implantou a *Empyro*, planta especializada na produção de bio-óleo em escala comercial no ano de 2015. A planta tem capacidade de operar 5 ton/hora de biomassa transformando-a em bio-óleo, além de aproveitar o vapor para eletricidade. Tal tecnologia pode ser uma opção para o aproveitamento energético da biomassa florestal e pode ser acoplada em indústrias de base florestal, transformando-a em uma biorrefinaria.

#### 4.4. GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

O processo de gaseificação de combustíveis sólidos ou líquidos é antigo e é realizado com o objetivo de produzir um combustível gasoso com melhores características para ser transportado, com melhor eficiência de combustão e que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos (CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA, 2002).

A gaseificação da biomassa pode ser uma opção para transformar resíduos florestais, tanto para a produção de combustíveis líquidos, principalmente para usos automotivos, quanto para a geração de eletricidade em grande escala e, pode ser utilizada objetivando grandes ou pequenas potências. Para o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008) a gaseificação de biomassa ainda não é uma tecnologia considerada viável. Para Lora *et al.* (2008), mesmo a

gaseificação apresentando vantagens em relação a queima direta da biomassa, existem algumas desvantagens técnicas que devem ser levadas em consideração, pois é um processo mais complicado tecnicamente e é necessário dar atenção especial à limpeza de gases.

O processo de gaseificação pode ser uma importante opção para geração de energia elétrica em locais isolados, como foi demonstrando no Projeto GASEIFAMAZ na região Amazônica no período de 2002 a 2005 (COELHO; GARCILASSO, 2018). O referido Projeto teve como objetivo testar a tecnologia de gaseificação que foi importada da Índia (um sistema de 20 kW) para aproveitamento dos resíduos de biomassa que são gerados localmente. O sistema indiano foi testado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – (IPT) e, adaptações foram realizadas com o objetivo de simplificar a operação na comunidade atendida pelo Projeto, que também recebeu treinamento específico para operar o equipamento. Tal tecnologia pode ser aplicada para geração de energia em sistemas isolados, utilizando os resíduos gerados nas localidades da Amazônia Legal.

Em outros países como na Finlândia, o reator do tipo leito fluidizado circulante para a gaseificação já está maduro e, nos países nórdicos, projetos estão sendo desenvolvidos com sucesso (CARVALHO, 2014).

A *International Energy Agency*, 2023 hospeda o website chamado “*Gasification of biomass and waste*” formado pelo grupo de trabalho denominado “Task 33”, que pode ser acessado no link: [http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal\\_gasification](http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal_gasification). O “Task 33” é formado por especialistas internacionais de nove países: Áustria, Dinamarca, Alemanha, Itália, Holanda, Noruega, Suécia, Suíça e EUA e, é um importante banco de dados sobre a tecnologia de gaseificação, com dados técnicos, relatórios, divulgação de eventos e informações das plantas de gaseificação existentes em alguns lugares do mundo em tempo real. São mais de 100 plantas com diversas informações, desde o tipo de tecnologia, qual a matéria-prima, localização, entre outros. É uma importante fonte de dados para acompanhar o estágio atual da maturidade tecnológica da gaseificação.

Vale mencionar que a tecnologia de gaseificação possui dificuldades a serem dominadas, como questões ligadas ao pré-tratamento da matéria-prima, a limpeza dos gases gerados, baixo poder calorífico do gás gerado e dificuldade de operar em grandes escalas.

O Brasil possui recursos de biomassa abundantes e, na parte florestal poderia agregar também sistemas de gaseificação em empresas do setor de papel e celulose ou outras indústrias de base florestal, utilizando os resíduos florestais para gerar gás ou outro insumo a partir da gaseificação, na ótica do conceito de biorrefinaria. E ainda ser o processo para a partir do gás de síntese produzir hidrogênio musgo.



#### 4.5 . PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DE BIOMASSA

O hidrogênio, atualmente, tem sido tema de vários eventos e pesquisas, pois aparece como uma grande oportunidade para descarbonizar o planeta, apresentando-se como uma promissora fonte de energia. Esse elemento pode ser produzido tanto por fontes renováveis como fontes não renováveis. Em termos globais, a produção de hidrogênio é dominada pelo uso de combustíveis fósseis e o Brasil pode ter papel de destaque, em função da grande participação de fontes renováveis que podem ser utilizadas para a produção de hidrogênio, como eólica, solar e hidroeletricidade, que a partir da eletrólise pode produzir hidrogênio e que também a partir da biomassa poderá produzir hidrogênio (OLIVEIRA, 2022).

Como são várias as fontes para produção de hidrogênio, ele vem sendo descrito se referenciando a várias cores, conforme **Quadro 03**.

**Quadro 03:** Hidrogênio e suas cores

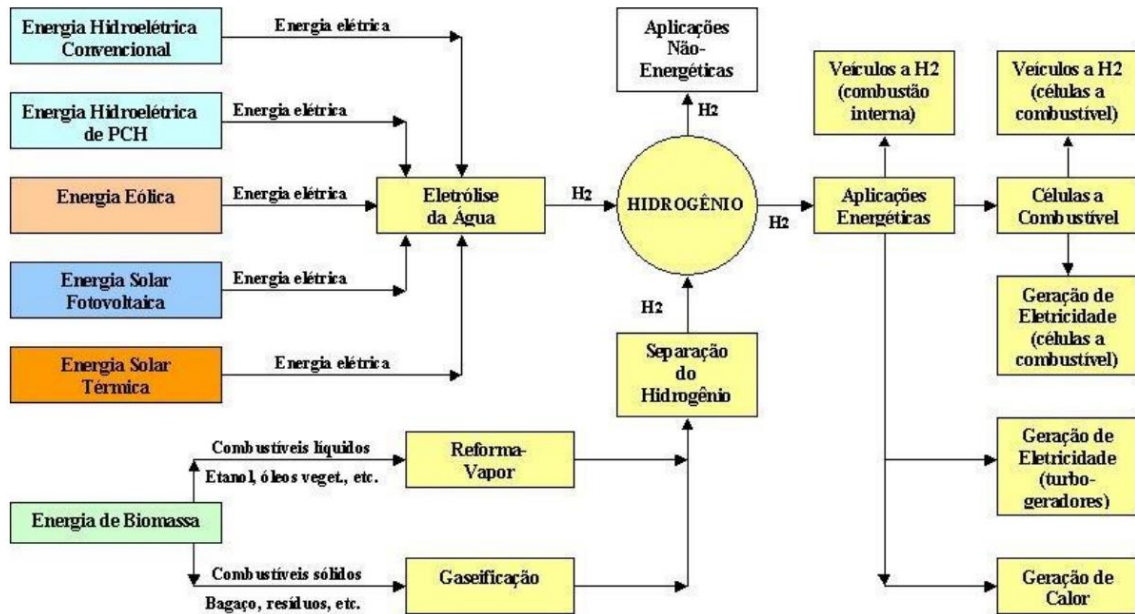
Cor do Hidrogênio	Informações
Preto	Produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrom	Produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
Cinza	Produzido do gás natural, sem CCUS
Azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.
Verde	Produzido a partir de fontes renováveis (em especial energia eólica e solar) via eletrólise da água.
Branco	Hidrogênio natural ou geológico.
Turquesa	Produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO <sub>2</sub> .
Musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, por meio de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica
Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear.

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2021)

Em relação às fontes renováveis, a produção de hidrogênio aparecerá nas cores verde e musgo, verde advindo das fontes eólica, solar, hidrelétrica e solar térmica e, o musgo vai ser produzido, a partir da biomassa, que poderá ser líquido (etanol), gasoso (biogás) e sólido

(biomassa sólida) e, nessa última, a biomassa florestal pode vir a ser uma fonte de matéria-prima, conforme **Figura 9**.

**Figura 9:** Fontes e rotas renováveis de produção de hidrogênio



Fonte: Alves, 2018

A partir de fontes de biomassa sólida, como a biomassa florestal, a rota para a produção de hidrogênio seria termoquímica, via gaseificação, onde será produzido o gás de síntese e, então, o gás de síntese passará por um processo de separação e purificação para chegar ao  $H_2$ .

As pesquisas para o desenvolvimento da produção de hidrogênio estão em andamento, mas as maiores apostas no Brasil estão em fontes como eólica e solar via eletrólise, pois a gaseificação da biomassa ainda possui desafios tecnológicos e não é considerada uma tecnologia pronta (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2019).

Segundo Oliveira (2022), os principais usos e aplicações do hidrogênio estão ligados à produção de amônia, produção de metanol e seu uso em refinarias, siderurgia, indústria de alimentos, semicondutores e aplicações energéticas.

#### 4.6 . COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR DE MADEIRA

A energia termelétrica é originada como toda e qualquer energia produzida por uma central cujo funcionamento ocorre a partir da geração de calor resultante da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, gerando eletricidade (RIBEIRO, 2018).

A combustão da madeira é a queima direta para produção de energia, sendo um processo complexo que envolve reações químicas e transferência de calor e massa e, o combustível, no caso da madeira ou biomassa florestal, precisa ter um alto poder calorífico, pois quanto maior, melhor será a sua utilização na queima direta (SANTOS *et al.*, 2013). Os autores complementam que características como a composição química e elementar, além dos teores de umidade e densidade básica, devem ser analisados previamente, porque influenciam na qualidade da matéria-prima e na combustão.

Uma das tecnologias mais consolidadas no Brasil é a do ciclo a vapor (*Rankine*), que é considerada uma rota tecnológica simples que se fundamenta no uso de água/vapor como fluidos de transporte e armazenamento de energia em que, quando utilizando a biomassa, que pode ser a florestal, irá ocorrer a combustão direta para geração de vapor superaquecido, o qual vai alimentar turbinas a vapor para a geração de energia elétrica de origem térmica (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008; FOELKEL, 2016 apud RIBEIRO 2018).

De acordo com Ribeiro (2018) uma Usina termelétrica que utiliza cavaco de madeira terá o seu funcionamento a partir da queima dessa biomassa que irá aquecer a água no reservatório em caldeiras, formando um vapor superaquecido, que será direcionado para turbinas do gerador responsável pela produção de eletricidade. A eletricidade gerada poderá ser consumida pela própria indústria que possui a usina ou destinada ao sistema elétrico, consumidores cativos e geração distribuída, via redes de distribuição elétrica.

A geração de energia em usinas termelétricas por biomassa florestal ainda corresponde a uma ínfima parcela da oferta interna de energia no Brasil, embora o país possua recursos florestais abundantes, podendo utilizar resíduos florestais e plantios dedicados à geração de eletricidade. Estados como Mato Grosso do Sul já possuem termelétricas a partir de biomassa florestal abastecidas por resíduos de serrarias, mas podem ser também por biomassa oriundos de plantios de eucalipto dedicados a esse uso.

Um dos principais exemplos de cogeração no Brasil acontece na indústria de celulose e papel, em que se produz eletricidade para o consumo do seu processo e fornece excedentes para geração distribuída, abastecendo empresas próximas às centrais termelétricas geradoras ou ainda podem compartilhar o excedente por meio do sistema elétrico nacional (FOELKEL, 2016). Para isso, utiliza-se como fonte de matéria prima o resíduo do processo de polpação, conhecido como licor negro, ou lixívia, ou ainda resíduos florestais oriundos da colheita das árvores.

Os sistemas de cogeração produzem energia térmica e eletricidade empregando um único insumo energético, podendo ser classificados em duas configurações básicas, conforme

as turbinas que empregam, sendo sistemas com turbinas a vapor e com turbinas a gás. Os que são mais amplamente utilizados nas indústrias de celulose e papel são os sistemas com turbinas a vapor de alta pressão (BARBELI, 2015). Acrescenta-se que existem várias configurações de sistemas de cogeração com maior grau de eficiência que vem sendo utilizados nas indústrias de celulose e papel.

Em 2000, Velásquez fez um estudo sobre a cogeração de energia no segmento de papel e celulose, em que foi avaliado o potencial de geração de eletricidade com a introdução de tecnologias mais eficientes e menor impacto ambiental. A autora apresentou um estudo de caso realizado na empresa Klabin no Paraná. Já em 2006, Velásquez apresentou, em sua tese de doutorado, as perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica para o mesmo setor, agregando a utilização de sistemas de gaseificação.

Desde então, a tecnologia de cogeração no setor de papel e celulose evoluiu, principalmente em relação à eficiência energética e, hoje as plantas industriais mais atuais geram a energia necessária ao seu processo e ainda comercializam o excedente no Sistema Interligado Nacional (SIN).

A indústria de celulose e papel demanda um alto consumo energético em todo o seu processamento e poder aproveitar os resíduos gerados em diferentes etapas para produzir a energia necessária, e ainda poder comercializar o seu excedente, faz desse setor um caso de sucesso no Brasil. Inclusive algumas empresas do setor já estudam oportunidades para diversificar seus produtos a partir da lignina potencializando suas biorrefinarias.

#### 4.7. BIORREFINARIAS À BASE DE BIOMASSA FLORESTAL

A biorrefinaria é um conceito que pode ser aplicado às indústrias do setor florestal visando o aproveitamento completo da biomassa florestal, pois a complexidade química da madeira traz uma ampla possibilidade de processamento químico e termoquímico, visando a produção de bioprodutos, biocombustíveis, além da geração de energia (SILVA JUNIOR, 2008).

Assim, o conceito de biorrefinaria surge análogo ao conceito de refinaria de petróleo, já que o objetivo é extrair diferentes produtos oriundos da biomassa, como é feito com o petróleo em suas refinarias. Segundo Silva Junior (2008), em termos gerais, biorrefinarias estão associadas às instalações industriais que integram processos de conversão de biomassa e equipamentos para a produção de combustíveis, energia e produtos químicos.

No Brasil uma das indústrias que mais se aproxima do conceito de biorrefinaria, e que vem desenvolvendo pesquisas para diversificar os produtos oriundos da biomassa, é a de celulose e papel. As empresas que produzem carvão vegetal também podem desenvolver biorrefinarias, desde que aproveitem os gases oriundos da carbonização ou recuperação de outros subprodutos, como o ácido pirolenhoso.

Tecnologias de gaseificação e pirólise rápida acopladas às indústrias de base florestal, utilizando resíduos florestais, também podem se encaixar no conceito de biorrefinaria.

Segundo Foelkel (2016) o aproveitamento energético da biomassa florestal ainda utiliza rotas tecnológicas tidas como simples, como no caso da combustão direta para geração de vapor superaquecido para alimentar turbinas a vapor para geração de eletricidade de origem térmica e, esse autor acredita que existe uma forte tendência para o crescimento de outras tecnologias para geração de energia e outros bioprodutos a partir do insumo florestal em unidades de biorrefinaria. As biorrefinarias poderiam produzir gás a partir da biomassa florestal por meio da gaseificação e, esse gás, poderia abastecer caldeiras a gás e produzir eletricidade. Mesmo sendo uma tecnologia incipiente no Brasil, já vem sendo utilizada em países como a Suécia, Alemanha, Finlândia Canadá e Estados Unidos.

## **5. ESTUDO DE CASO: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO A PARTIR DE RESÍDUOS DE UMA SERRARIA LOCALIZADA NO ESTADO DO PARÁ**

### **5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A extração e processamento da madeira é uma das principais atividades econômicas da Amazônia. Segundo o Imaflora, em 2018 foram produzidos cerca de 6,2 milhões de m<sup>3</sup> de produtos de madeira nativa (chapas e lâminas, madeira serrada para a construção civil, e produtos acabados de madeira), sendo que 2,2 milhões de m<sup>3</sup> foram consumidos dentro da própria Amazônia. O Estado de São Paulo é o principal comprador da madeira extraída na Amazônia, consumindo cerca de 20 % do total produzido.

Segundo o Imazon e o Serviço Florestal Brasileiro (2010), na Amazônia Legal existem cerca de 71 polos madeireiros (30 se localizam no Estado do Pará) com mais de 2000 indústrias, com uma receita bruta que pode ter chegado a US\$ 2,4 bilhões e geração de cerca de 204 mil empregos no ano de 2009.

O setor florestal e madeireiro é de suma importância para a região amazônica, mas necessita de soluções tecnológicas para o aproveitamento dos resíduos gerados nas serrarias. A atividade de desdobro da madeira gera, pelo menos, 50 % de resíduos em relação ao que entra para ser serrado e, para se ter uma ideia só no ano de 2009, a região da Amazônia Legal gerou mais de 8 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos de madeira.

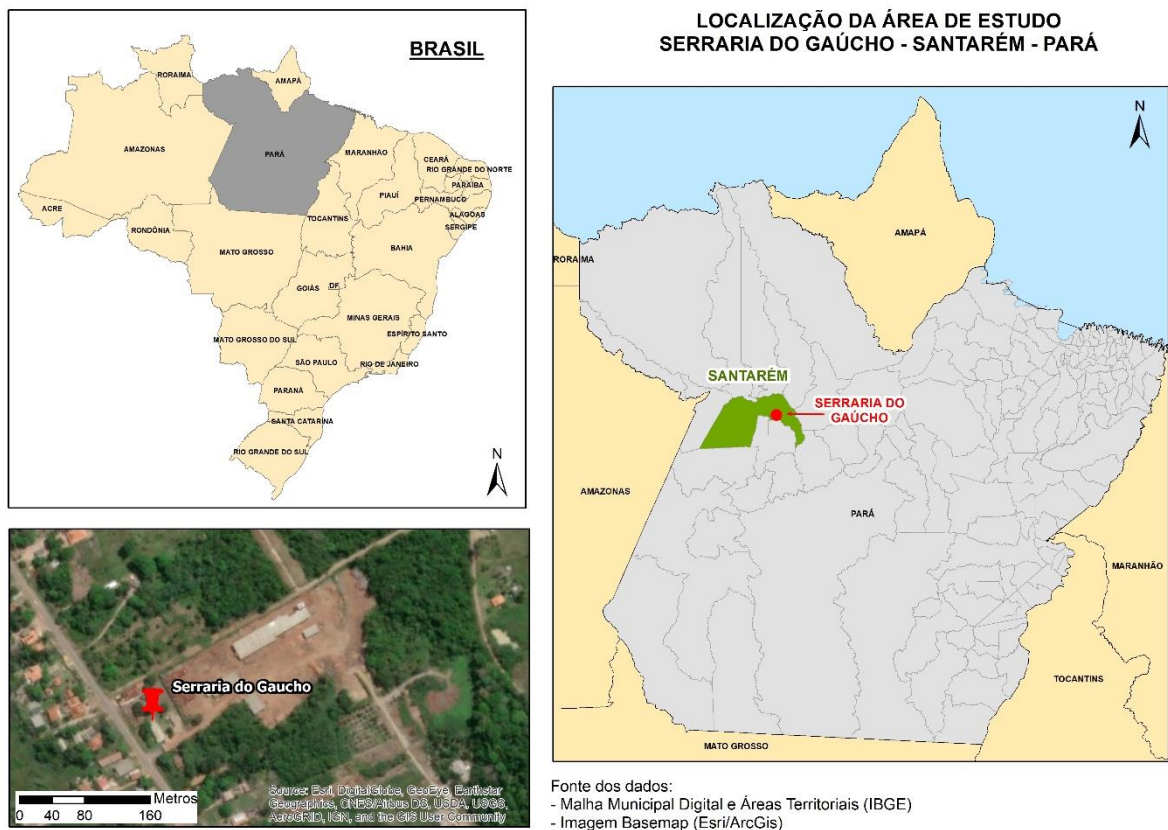
Dentre esses empreendimentos, há grandes serrarias (exemplo: empresa Mil Madeiras, localizada no município de Itacoatiara, no estado do Amazonas, que gera 40% da energia do município a partir dos resíduos florestais em termelétrica, município esse com mais de 100 mil habitantes) que fazem algum tipo de aproveitamento, mas ainda há serrarias que não possuem nenhum tipo de aproveitamento e acabam doando os resíduos ou enviando para aterros sanitários. Enfatiza-se, nesse cenário, que já há tecnologias que podem prover destinação para esses resíduos, como a combustão dos resíduos em caldeira para produzir energia para secagem da madeira beneficiada, além de produção da energia necessária para a operação da serraria, a gaseificação de biomassa, a briquetagem e a pelletização. Tais tecnologias agregam valor aos resíduos, colaboram com uma destinação correta, diminuindo problemas ambientais, e ainda podem gerar renda ou diminuição de custos com a conta de energia elétrica, colaborando com a economia circular local e regional.

Segundo Valdiones (2022) a logística e o acesso a mercados dificultam o aproveitamento de resíduos em projetos de cogeração ou em aproveitamento de subprodutos, mostrando que o setor florestal madeireiro na região amazônica necessita de investimentos e de soluções inovadoras para agregação de valor e aproveitamento de resíduos.

## 5.2. ESTUDO DE CASO: QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS E SEU APROVEITAMENTO NA “SERRARIA DO GAÚCHO”

A “Serraria do Gaúcho”, de propriedade do Senhor Altemir André Schimitt, está localizada na Rodovia Santarém – Curuá Una, km 16, na área rural do município de Santarém no estado do Pará, na região da Amazônia Legal brasileira. A serraria foi selecionada para realização de um estudo de caso visando quantificar os resíduos gerados na operação de processamento primário (desdobro) da madeira, conhecendo toda a operação da serraria, identificando o que é realizado atualmente com os resíduos, apontando soluções para o aproveitamento energético e avaliando os investimentos necessários para a implantação. A localização da serraria é apresentada na **Figura 10**.

**Figura 10:** Localização da “Serraria do Gaúcho”



Fonte: Elaboração própria

No período de 27 de junho a 01 de julho de 2022 foi realizada uma visita técnica na S&A Indústria e Comércio de Madeiras Ltda, conhecida como “Serraria do Gaúcho”, para coleta de dados referente à geração de resíduos do local (quantidades e tipos de resíduos gerados).

Durante a visita técnica foi possível conversar com o proprietário e com diversos funcionários, objetivando conhecer o dia a dia da operação da serraria e realizar coleta de dados envolvendo desde a chegada da madeira até a expedição dos produtos comercializados, incluindo a destinação dos resíduos.

A serraria está implantada em uma área de 64.744 m<sup>2</sup> e possui 36 (trinta e seis) funcionários que trabalham os 12 (doze) meses do ano em jornadas de 8 (oito) horas, de segunda a sexta, e 4 (quatro) horas no sábado, totalizando 44 horas semanais, 176 horas mensais e 2112 horas anuais.

A serraria é composta pelos seguintes equipamentos: 2 (duas) serrafitas, 01 (uma) alinhadeira, 01 (uma) destopadeira (topejadeira), 01 (um) guincho, 02 (duas) carregadeiras, 01(um) caminhão. O local atualmente não possui estufa de secagem para a madeira serrada e,

o método de secagem utilizado é o natural. Além disso, há uma máquina de desengrosso (laminador) e uma plaina. Na serraria também são delimitados os espaços para o pátio de estocagem de toras de madeira e o pátio de expedição de produtos de madeira serrada, conforme **Figura 11** (A e B).

**Figura 11 (A e B):** Pátio de estocagem de toras e Pátio de Expedição de produtos de madeira



Fonte: Autora

Os principais produtos comercializados pela serraria são sarrafo, caibro, ripa, tábua, prancha, viga, vigota e pranchão desdobrado e 90% do que é produzido, é exportado para países como Bélgica, França e Holanda. Os 10% restantes são então comercializados no mercado Nacional para o Nordeste, em especial para os estados da Bahia, Paraíba e Pernambuco.

A “Serraria do Gaúcho” possui certificação de sua operação do tipo cadeia de custódia em que é auditada 1(uma) vez por ano e, possui licença de operação emitida pela Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS). Segundo os seus responsáveis, atualmente cerca de 70% da madeira serrada têm origem certificada e 30% têm a origem legalizada. O planejamento da empresa será operar a serraria com madeira 100% certificada no futuro breve, pois visam o mercado internacional e apostam que a certificação será um diferencial.

No período da coleta de dados, a Serraria estava trabalhando com as toras de madeira que foram adquiridas da empresa Agroflorestal – Novo Horizonte Ltda, em que foram obtidos 6.076,5940 m<sup>3</sup>, no período de 25 de novembro de 2021 a 21 de fevereiro de 2022, extraídos no município de Prainha no Pará, sob o modelo de manejo florestal sustentável certificado. Segundo relato do setor administrativo da serraria, a madeira é adquirida por projeto e, o volume relatado era de um projeto da referida empresa Agroflorestal – Novo Horizonte, que foi a responsável pela extração das toras. O Código de Certificação é o FSC ®: SCS-FM/COC-007259 (SYSFLOR, 2022; FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022)

Segundo relatos coletados na serraria, a extração de madeira em áreas de manejo florestal acontece por 6 (seis) meses, compreendendo o período de julho a dezembro,



caracterizado por ser a época de seca em que é possível entrar com máquinas nas áreas florestais e trafegar pelas estradas rurais. Já no período de janeiro a junho, período chuvoso, que recebe o nome de defeso, não pode haver extração de madeira nas áreas de manejo. Assim, esse projeto adquirido (lote com madeiras em tora) no final do segundo semestre de 2021 estava sendo serrado no 1º semestre de 2022. Tal restrição para a extração de madeira em áreas de manejo florestal são detalhadas na Instrução Normativa nº 03 de 10 de outubro de 2017 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará.

O referido projeto era composto por 04 (quatro) espécies florestais descritas na **Tabela 02**.

**Tabela 02:** Espécies Florestais adquiridas para processamento na “Serraria do Gaúcho”

Nome comum	Nome Científico	Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> )	Fonte
Jarana	<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A. Mori	720	IPTa
Sapucaia	<i>Lecythis pisonis</i> Cambus	860	Silva et al (2022)
Maçaranduba	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	833	IPTb
Maparajuba	<i>Manilkara</i> <i>bidentata</i> (A.DC.) Chevalier	830	Melo (2002)

**Fonte:** Elaboração própria

Ressalta-se que não foram informados os quantitativos de aquisição por espécie, apenas o quantitativo total do projeto ou lote de compra.

Segundo informações coletadas na serraria, no período de 25 de novembro de 2021 a 27 de junho de 2022, foram serrados 4793,89 m<sup>3</sup> de toras de madeiras, ou seja, uma média de 684,84 m<sup>3</sup> por mês. Nesse mesmo período serrou-se 2353,61 m<sup>3</sup>, ou uma média de 336,23 m<sup>3</sup> por mês. Esses dados mensais foram utilizados para realizar os cálculos anuais. Com esses dados foi possível calcular o rendimento da serraria, a partir da seguinte equação (LOPES et al 2018):

$$R = M/T \times 100 - \text{Equação 1}$$

Em que:

$R$  = Rendimento em porcentagem (%)

$M$  = Volume de madeira serrada ( $m^3$ )

$T$  = Volume de toras utilizado para obter a madeira serrada ( $m^3$ )

Após o cálculo foi possível constatar que a taxa média de aproveitamento de madeira serrada da serraria é de 49,10 % e a porcentagem de geração de resíduos (que incluem diversos tipos de resíduos como serragem ou pó de serra, maravalha, costaneiras, lascas, cascas, entre outros) são contabilizados em 50,90 %, conforme **Figura 12 (A e B)**. Assim, a geração de resíduos foi de cerca de 348,61  $m^3$ , ou aproximadamente 282,64 toneladas de resíduos por mês.

**Figura 12 (A e B):** Disposição de resíduos no entorno da serraria



Fonte: Autora

É importante destacar que, segundo Tsoumis (1991), o rendimento em madeira serrada pode ser influenciado pela espécie, diâmetro e comprimento da tora, conicidade e defeitos presentes, pelos equipamentos utilizados no desdobro, bem como sua manutenção e ainda podem estar relacionados ao tipo de corte, habilidade e experiência dos operadores da serraria.

Além das questões técnicas, há também uma legislação específica que indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos florestais madeireiros brutos e processados devem atender, referente ao coeficiente de rendimento volumétrico – (CRV) tanto no âmbito federal quanto no estadual. De acordo com o Conama, “o CRV varia de acordo com a espécie florestal, a qualidade da matéria-prima, o tipo de processo industrial, o nível de tecnologia da indústria, o tipo e a qualidade do produto final, a realização de aproveitamento comercial” (CONAMA, 2009). No caso de processamento de madeira serrada, o coeficiente de rendimento volumétrico “pode ser de até 45% para a conversão de tora e torete para madeira serrada” (CONAMA, 2018). Ainda de acordo com a Resolução, as indústrias transformadoras de

madeira que apresentarem CRV acima de 45% deverão apresentar estudos técnicos, os quais serão analisados pelo órgão ambiental competente.

Tal controle é extremamente importante para garantir a legalidade da madeira e, as informações referentes ao coeficiente de rendimento volumétrico, são inseridas no Sistema de Comercialização e Transporte de Produtos Florestais (SISFLORA) que é integrado ao Sistema de Cadastro de Consumidores de Produtos Florestais (CEPROF), no estado do Pará. No âmbito federal o Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (SINAFLOR) é uma das ferramentas para controlar a origem da madeira, do carvão vegetal e outros produtos ou subprodutos florestais, havendo, por fim, uma integração entre os sistemas federal e estadual. Ressalta-se que todo produto florestal de origem nativa deve ter o Documento de Origem Florestal (DOF), uma licença obrigatória para o seu transporte e armazenamento. Tais ferramentas fazem parte da gestão de monitoramento e controle da legalidade dos produtos florestais de origem nativa no Brasil.

Em relação ao volume de resíduos gerados na serraria, atualmente não há nenhum uso ou reaproveitamento dos resíduos, sendo esses dados para 02 (dois) frigoríficos e 01 (uma) olaria na região, que realizam a queima desses resíduos para utilizar a energia gerada em seus processos produtivos. Em média, é retirado da serraria 4 caminhões (**Figura 13**) por dia com capacidade para 4 toneladas cada, ou seja, cerca de 16 toneladas por dia. É importante ressaltar que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL,2010) preconiza a correta e adequada destinação dos resíduos gerados em empreendimentos industriais. Além da PNRS, como a serraria possui certificação de cadeia de custódia, é necessário que o empreendedor faça uma correta destinação do resíduo gerado na sua operação e, no momento, a destinação realizada tem sido a doação para terceiros.

**Figura 13:** Caminhão sendo carregado com resíduos para doação



Fonte: Autora

Foi informado também que há estudos iniciados para a implantação de secagem artificial dos produtos serrados, onde os resíduos poderiam ser aproveitados gerando a energia necessária ao processo. Atualmente, a serraria utiliza 100% de energia elétrica em toda a sua operação, oferecida pela Concessionária Grupo Equatorial Energia – Pará. Estima-se que o valor médio da conta mensal é R\$10.000,00 (dez mil reais) e a secagem dos produtos serrados é realizada no formato natural.

### 5.3. ASPECTOS REFERENTES À SECAGEM DE MADEIRAS

A secagem da madeira é um importante processo do beneficiamento da madeira, havendo a perda de água e, conseqüentemente, serão obtidos inúmeros benefícios para os seus produtos. De acordo com Glass e Zelinka (2012), a secagem da madeira tem como objetivo deixar a madeira com o teor de umidade próximo ao que o seu produto deverá ter em uso, podendo depender da destinação da madeira, como por exemplo entre 12 e 18% para uso em construção externa e 8 e 11 % para madeira em uso em construção interna (PONCE; WATAI 1985 apud OLIVEIRA 2021).

Segundo Marques e Martins (2002), o processo de secagem da madeira possui uma série de vantagens, tais como:

- Estabilidade dimensional da madeira: reduzindo a ocorrência de empenos, rachaduras ou outras alterações;
- Redução de manchas e apodrecimentos por fungos e insetos: abaixo de 20% de umidade a madeira aumenta a imunidade ao ataque desses microrganismos;

- Redução do peso da madeira: barateando o custo do transporte;
- Melhor tratabilidade: pois abaixo de 20% de umidade a madeira absorverá melhor os preservantes e retardantes para o fogo e, tem a melhor fixação de tintas, vernizes e outros materiais de acabamento e acabamentos como aplainamento e lixamento são beneficiados;
- Melhora da resistência mecânica em relação às propriedades mecânicas;
- Melhoria da aderência em produtos colados;
- Melhor fixação de pregos e parafusos;
- Melhoria nas propriedades de isolamento diminuindo a condução de calor.

Os autores ainda destacam que as madeiras apresentam características que influenciam na secagem, citando:

- Densidade da madeira: a densidade está relacionada com a permeabilidade da madeira, que é um dos fatores que influenciam na secagem. Madeiras mais densas vão exigir um tempo maior para secar que madeiras menos densas;
- Espessura: peças de madeira com maior espessura vão precisar de maior tempo de secagem do que as de menor espessura;
- Relação cerne/alburno: o alburno seca mais rápido que o cerne, mesmo tendo um maior teor de umidade, pois possui maior permeabilidade;
- Orientação do corte: no sentido longitudinal, o fluxo de umidade é de 10 a 15 vezes maior do que no transversal e, no sentido transversal, o fluxo de umidade é de 20 a 50% maior no sentido radial do que no tangencial.

Os principais métodos utilizados para secagem de madeira são conhecidos como secagem natural ou ao ar livre e secagem artificial.

Para Zen (2016), o tipo de secagem natural ou ao ar livre apresenta controle limitado ou, muitas vezes, considerado inexistente. No entanto, se bem conduzida a qualidade da secagem da madeira não será inferior à secagem artificial. Esse tipo de secagem é amplamente utilizado no Brasil, em especial na região Norte que apresenta clima tropical com grande intensidade luminosa. Os produtos de madeira ficam empilhados em local ventilado e, preferencialmente coberto num prazo que pode ultrapassar 120 dias, a depender da temperatura, umidade relativa do ar e movimento do ar no meio das peças (MARQUES; MARTINS, 2002). O investimento para esse tipo de secagem é baixo.

A serraria, objeto desse estudo de caso, atualmente faz a secagem de seus produtos madeireiros utilizando o tipo de secagem natural ou ar livre, conforme **Figura 14**.

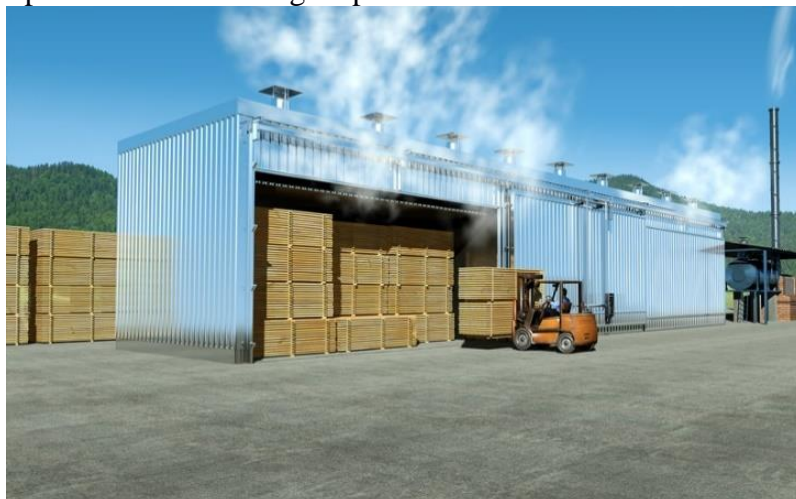
**Figura 14 (A e B):** Pilhas de madeira em Processo de secagem em pátio coberto



Fonte: Autora

O outro tipo de secagem é conhecido como secagem artificial ou convencional. Nesse tipo são utilizadas estufas (**Figura 15**) e é possível monitorar as variáveis como a temperatura, a velocidade de circulação do ar e a umidade relativa (ALMEIDA, 2011). O prazo para a secagem dos produtos é muito menor, comparado ao método de secagem natural, ocorrendo em dias. Porém, é necessário um investimento inicial para a aquisição da estufa, além de treinamento de mão-de-obra e da demanda de energia para o seu funcionamento.

**Figura 15:** Exemplo de estufa de secagem para madeira serrada



Fonte: Nicawe Equipamentos e Soluções para Indústria (2020)

Autores como Susin (2018) mencionam a preocupação com o gerenciamento da secagem de madeiras de espécies nativas da Amazônia em estufas, dada a sua variabilidade de

características, em especial da densidade, que pode variar de 0,34 a 0,97 g/cm<sup>3</sup>. Assim, para se obter uma melhor eficiência na secagem, o ideal é organizar lotes com a mesma espécie ou com espécies com as mesmas características. Tal situação na serraria estudada poderia ser facilmente adequada, já que no momento da coleta de dados, a serraria estava trabalhando apenas com 04 (quatro) espécies de madeira.

Para o volume de madeira serrada na “Serraria do Gaúcho” foi indicado uma estufa com capacidade para secagem de 75 m<sup>3</sup> de madeira em ciclos de 4 dias. Como a Serraria beneficia, a partir do desdobro um pouco mais de 15 m<sup>3</sup> por dia, seriam necessários 05 dias de trabalho para produzir a carga necessária para a estufa que funcionará utilizando o vapor gerado no sistema de caldeira e turbina.

#### 5.4. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE AMOSTRA DE RESÍDUOS DA SERRARIA

A caracterização dos resíduos florestais gerados no beneficiamento de toras de madeira na serraria, a partir de ensaios físico-químicos, como análise elementar e imediata e poder calorífico, aponta informações importantes sobre os resíduos e colabora com a melhor definição da tecnologia de aproveitamento energético.

Para se ter uma ideia dos resíduos da serraria, foi coletada uma amostra composta da pilha de resíduos de serragem (**Figura 16**), oriunda das espécies: *Lecythis lúrida*, *Lecythis pisonis*, *Manilkara huberi* e *Manilkara bidentata*, e encaminhada para o laboratório, onde a amostra foi caracterizada *in natura* e a preparação realizada, conforme os métodos propostos pelas Normas ASTM E1757 e ISO 14780. A amostra foi preparada no Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE) da Unidade de Energia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – (IPT), por meio das etapas de secagem e moagem, sendo necessária granulometria menor que 60 *mesh* para atender os requisitos das normas empregadas na caracterização físico-química.

**Figura 16:** Pilha de serragem localizada na “Serraria do Gaúcho”



Fonte: Autora

Os métodos e equipamentos utilizados para os ensaios foram:

- Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-21 – Método A nos equipamentos analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio (**Figura 17-A**), código.: 018793 e balança analítica, código.: LCL-433;
- Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-18e1 – Método A nos equipamentos: analisador de enxofre, código.: 43252 e balança analítica, código.: LCL-003.
- Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15;
- Determinação do carbono fixo, ASTM D3172-13(21) e1 (2013) c;
- Determinação do teor de cinzas, baseada na ASTM D1102-84(21) (2013)a nos equipamentos: balança analítica, código.: 83823, mufla, código.: 30802, termômetro, código.: 196487e cronômetro, código.: 44899;
- Determinação do teor de matérias voláteis, ASTM D1762-84(21) (2013)b nos equipamentos: balança analítica, código.: 83823; mufla, código.: 14910 e termômetro, 196487;
- Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865/D5865M-19 nos equipamentos: balança analítica, código.: 83823, bombas calorimétricas (**Figura 17-B**), com cabeçote códigos.: 3 e 4;
- Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(19) (2013) d nos equipamentos: balança, código.: 83823.e 21507, estufas, códigos.: 26296 e 40672, termômetro, código.: 9717815.



**Figura 17 (A e B):** A: Equipamento *Flash 2000* - Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio e B: Equipamento *Calorimeter 6400*



Fonte: Autora

O resíduo gerado em processamento primário em serrarias tem potencial de uso energético, mas para conhecê-lo é necessário realizar a sua caracterização físico-química, a partir de ensaios de análises elementar e imediata e poder calorífico. Conhecer as propriedades físico-químicas das biomassas, como os resíduos de madeira serrada, é importante para definir e escolher o processo mais adequado de conversão energética dos referidos resíduos, sendo uma das principais etapas do planejamento quando se pensa em aproveitamento energético.

Os resultados da caracterização físico-química (análise imediata, elementar e poder calorífico) da amostra de serragem da serraria realizados em base seca são apresentados na **Tabela 03**.

**Tabela 03:** Resultados da caracterização físico-química realizado em amostra composta de serragem

Ensaio		Resultado
Análise Elementar	Carbono	51,30%
	Hidrogênio	6,26%
	Nitrogênio	0,3%
	Oxigênio	40,56%
	Enxofre	0,18%
Análise Imediata	Cinzas	1,4%
	Materiais Voláteis	78,5%
	Carbono Fixo	20,1%
Poder Calorífico	PCS	20,76 MJ/Kg
	PCI	19,41 MJ/Kg
Teor de Umidade		27%

Fonte: Ensaios realizados no Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

O teor de carbono é uma propriedade química com maior % de massa na composição elementar da amostra avaliada. Essa característica contribui na combustão, gerando mais energia. As biomassas com maiores teores de carbono indicam um grande potencial para serem utilizadas em processos térmicos (SANTOS *et al.*, 2011). Já as concentrações elevadas de enxofre e nitrogênio, segundo Obernberger (2005), contribuem negativamente para a saúde humana e para o meio ambiente. Isto acontece devido à formação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) durante a combustão das biomassas, porém, em amostras de espécies de origem florestal, esses índices são baixos.

A amostra apresentou uma baixa variação em relação aos resultados de PCI e PCS que podem estar relacionados ao teor de umidade. O teor de cinzas em amostras de origem florestal, geralmente é baixo, o que é bom, pois essa característica pode influenciar diretamente na corrosão de equipamentos de conversão energética.

A caracterização físico-química de biomassas apresenta informações acerca das propriedades químicas e físico-químicas que podem ser consideradas determinantes, particulares para cada aplicação e, principalmente, o valor energético para a definição da tecnologia de aproveitamento energético, controle de emissões, corrosão e melhor desempenho do processo na geração de bioenergia.

## 5.5. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DA SERRARIA

No estudo de caso, inicialmente foi calculado o potencial de geração de energia elétrica dos resíduos (pó de serra, maravalhas, costaneiras e aparas) gerados no beneficiamento da madeira serrada na “Serraria do Gaúcho”, para se ter uma ideia desse potencial. Posteriormente, em item específico serão avaliadas alternativas tecnológicas e de utilização dos resíduos, que poderão ser adequadas para a serraria de pequeno porte. Para essa estimativa inicial, foi adaptada a metodologia de cálculo para conversão energética utilizada por Coelho *et al.* (2020) no “Atlas de Bioenergia para o Estado de São Paulo” para resíduos silviculturais de pinus e eucalipto e, aqui os resíduos são de espécies nativas.

Seguindo a metodologia proposta por Coelho *et al.* (2020) optou-se pelo sistema convencional de turbina a vapor do ciclo *Rankine* com eficiência de conversão termoeletrica ( $\eta$ ) determinada de acordo com as potências anuais, sendo a capacidade instalada de pequeno porte, para potências anuais entre 200 kW e 2 MW. Além disso, foi considerado um fator de

capacidade (FC) de 80% em ambos os cenários, resultando em 7.008 horas de operação por ano. Ressalta-se que tal metodologia vem sendo utilizada em cálculo de potencial de geração de energia elétrica de estados como São Paulo e Mato Grosso e o exercício aqui proposto, com os dados da serraria, serve para avaliar o potencial de geração de energia elétrica em empreendimentos de pequeno porte, visando colaborar com as análises sobre quais soluções para o aproveitamento energético dos resíduos poderão ser viáveis para a serraria em estudo.

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica foi utilizado um poder calorífico inferior (PCI) de 13.495,45 kJ/kg para os resíduos da “Serraria do Gaúcho” (determinado no Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do IPT), considerando um teor de umidade de 30%, equivalente a 3,76 MWh<sub>th</sub>/t de biomassa sólida. Já a densidade básica ( $\rho$ ) utilizada foi baseada na média das densidades das 04 (quatro) espécies que estavam sendo beneficiadas na “Serraria do Gaúcho”, utilizando o valor de 0,81 t/m<sup>3</sup>, conforme **Tabela 02**. A **Tabela 04** apresenta os parâmetros técnicos adotados.

**Tabela 04:** Parâmetros técnicos para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos da “Serraria do Gaúcho”.

Parâmetro	Valor	Unidade
PCI resíduo	3,76	MWh <sub>th</sub> /t de biomassa
Eficiência conversão termoelétrica Pequeno porte ( $\eta$ )	15	%
Eficiência conversão termoelétrica Médio porte ( $\eta$ )	30	%
Fator de capacidade	7008	Horas / ano

Fonte: Elaboração própria baseado em dados de Coelho et al (2020) e determinação em Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do IPT.

O cálculo de potencial de geração de energia elétrica do resíduo do processamento primário da madeira na “Serraria do Gaúcho” foi efetuado segundo a Equação 04.

Para o cálculo do volume de resíduos da “Serraria do Gaúcho”, foram utilizados os dados coletados em campo. Foi estimado que cerca de 684,84 m<sup>3</sup> de toras de madeira são serradas mensalmente, com beneficiamento de 336,23 m<sup>3</sup> de madeira serrada por mês e, anualmente cerca de 8218,10 m<sup>3</sup> de toras de madeira passam por beneficiamento, produzindo 4034,75 m<sup>3</sup> de madeira serrada.

Assim, para o cálculo do volume de resíduos, foi utilizada a equação

$$V_{\text{resíduos}} = (V_{\text{de toras}}) - (V_{\text{madeira serrada}}) \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

V resíduos = Volume de resíduos gerados em m<sup>3</sup>

$V_{toras}$  = Volume de toras em  $m^3$  que passa por beneficiamento

$V_{madeira\ serrada}$  = Volume de madeira serrada em  $m^3$

Logo o volume de resíduos gerados mensalmente é de cerca de 348,61  $m^3$  e anualmente é de 4183,35  $m^3$ , entre serragem ou pó de serra, maravalhas, costaneiras, aparas, entre outros.

O cálculo da energia elétrica disponível foi realizado pela equação

$$E = (\text{vol. de resíduos}) * (\rho) * (PCI_{resíduos}) * (\eta) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$E$  = Energia elétrica disponível (MWh)

$\text{volume de resíduos}$  = Pó de serra, maravalha, costaneiras, aparas, entre outros ( $m^3$ )

$\rho$  = Densidade da madeira ( $t/m^3$ )

$PCI_{resíduos}$  = Poder calorífico inferior do resíduo ( $MWh_{th}/t$  biomassa)

$\eta$  = Eficiência de conversão termoelétrica (%)

E a potência disponível foi calculada pela Equação 4

$$P = E/FC \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

$P$  = Potência disponível (MW)

$E$  = Energia elétrica disponível (MWh)

$FC$  = Fator de capacidade (horas/ano)

Como a serraria estudada é de pequeno porte, o seu potencial técnico de geração de energia elétrica, calculado a partir dos parâmetros definidos na Equação 04, foi de 0,27 MW anual e 0,02 MW mensal. Já a estimativa de energia elétrica disponível calculada, a partir dos parâmetros técnicos definidos na Equação 03, foi de 1.912,89 MWh por ano e 159,41 MWh por mês.

Para viabilizar a geração de energia elétrica em grandes quantidades seria necessário um volume maior de resíduos, como ocorre em serrarias de grande porte, como é o caso da Empresa Mil Madeiras, localizada no município de Itacotiara, no Estado do Amazonas. Nesta empresa, os resíduos originados produzem 40% da energia que abastece o município que tem cerca de 100.000 habitantes, por meio de uma termelétrica.

Outra possibilidade seria reunir várias serrarias na região de Santarém, que apresentem a mesma característica de não aproveitamento dos resíduos madeireiros, visando viabilizar um empreendimento de geração de energia na região. Ressalta-se que em Santarém há a Associação

das Indústrias Madeireiras de Santarém e Região Oeste do Pará (ASIMAS), que congrega cerca de 13 empresas associadas que poderiam liderar essa ação.

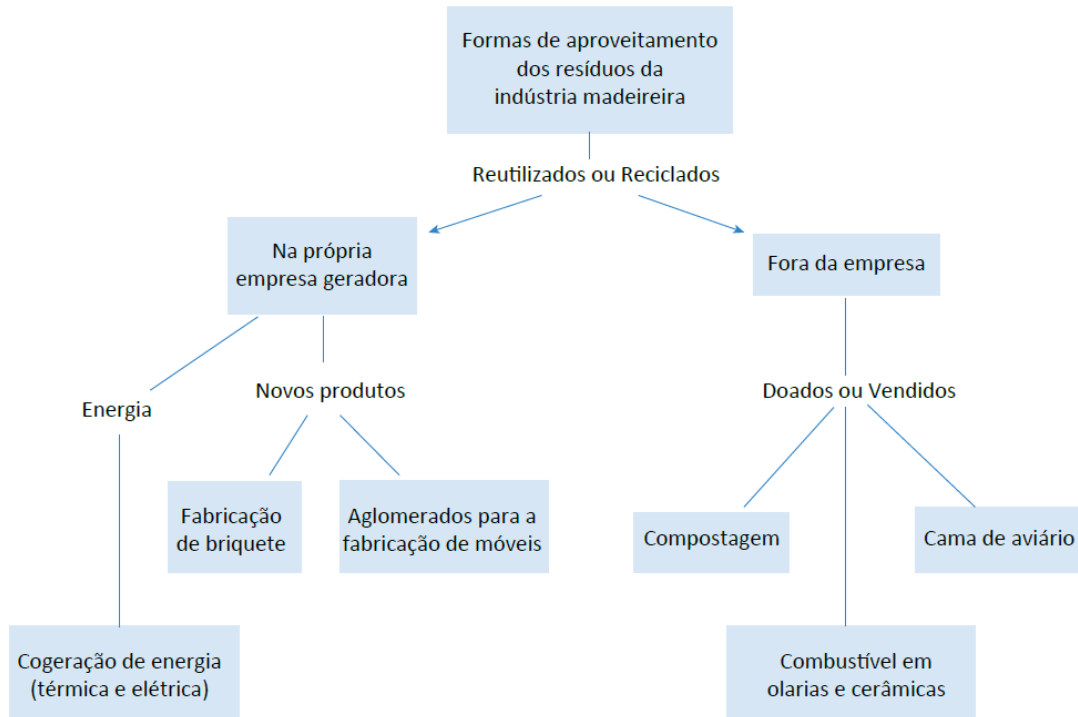
Dessa forma, na próxima seção serão avaliadas opções de aproveitamento do volume gerado de resíduos, considerando o aproveitamento na própria operação da serraria.

## 5.6. POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS GERADOS NA “SERRARIA DO GAÚCHO”

A serraria estudada, a partir de suas atividades de beneficiamento de madeira, gera cerca de 348,61 m<sup>3</sup> ou 282,64 toneladas por mês totalizando cerca de 4183,35 m<sup>3</sup> ou 3391,65 toneladas anualmente, divididos entre serragem ou pó de serra, maravalhas, costaneiras, aparas, entre outros. Hoje a Serraria não faz nenhum tipo de aproveitamento desse material, como ela possui certificação de cadeia de custódia e, em decorrência do atendimento à PNRS, a serraria necessita fazer uma correta destinação. No momento, são feitas doações desses resíduos para 02 (dois) frigoríficos e 01 (uma) olaria da região, que queimam esses subprodutos para utilizar a energia gerada em seus processos produtivos. Em média, é retirado da serraria 4 caminhões por dia com capacidade para 4 toneladas cada, ou cerca de 16 toneladas por dia.

O aproveitamento dos resíduos gerados na operação da serraria pode acontecer de várias formas, incluindo reutilização e reciclagem, abrangendo desde compostagem, como forração em granjas e currais, reaproveitamento dos resíduos maiores em pequenos objetos de madeira como brinquedos e cabos de utensílios domésticos, além do aproveitamento energético a partir de fabricação de *pellets* e briquetes, geração de energia, entre outros (GOMES; SAMPAIO, 2004, MENDONZA *et al.*, 2010, SILVA, 2011 e RAMOS *et al.*, 2017). Na **Figura 18** é possível observar as principais formas de aproveitar os resíduos gerados em uma serraria.

**Figura 18:** Principais formas de aproveitar os resíduos gerados em serrarias



Fonte: Ramos et al (2017)

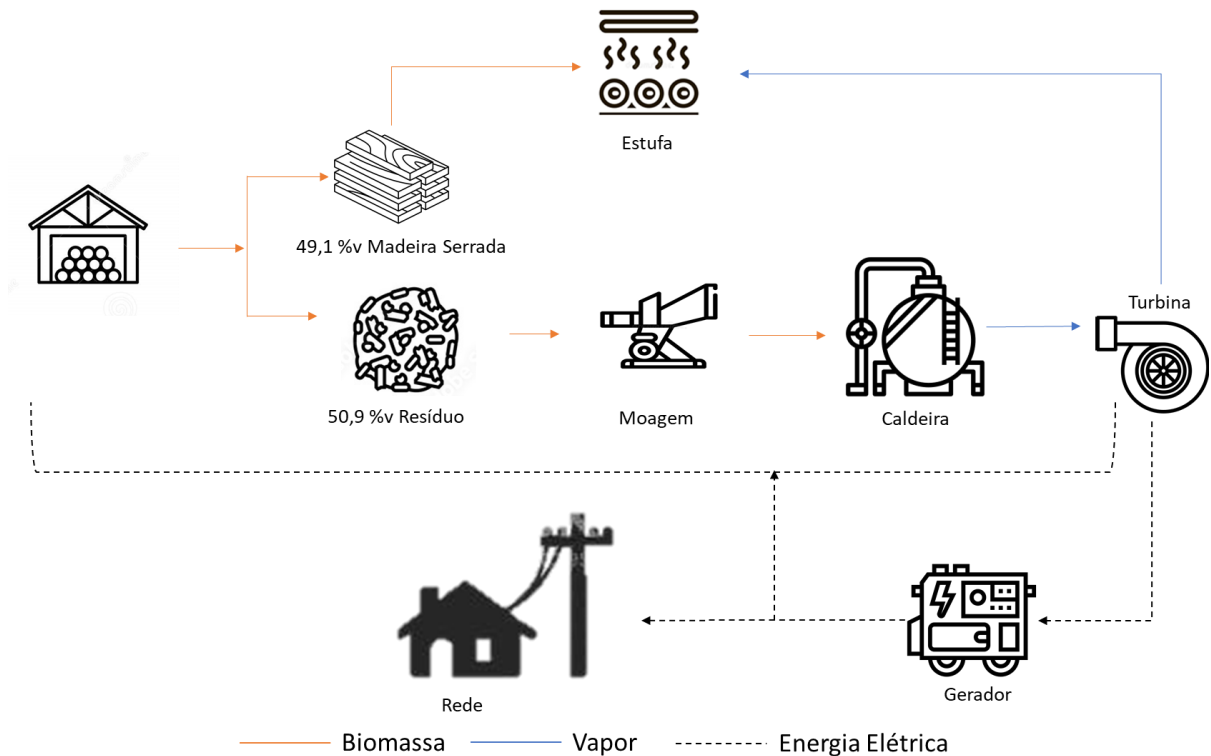
Pelas possibilidades apresentadas na **Figura 18**, é possível constatar que atualmente a serraria estudada faz o aproveitamento do tipo “reciclado” e “fora da empresa”, pois faz doação dos resíduos, que se transformam em combustível em uma cerâmica e dois frigoríficos, localizados na região de Santarém.

A partir do levantamento de dados realizados na empresa e do entendimento da operação da serraria, propõe-se 03 (três) possibilidades de aproveitamento para os resíduos gerados que se encaixam nas opções apresentadas por Ramos et al (2017). A primeira alternativa é a geração de energia, a segunda trata-se da produção de briquetes e a terceira é relativa à comercialização dos resíduos *in natura*. As três alternativas levaram em consideração buscar tecnologias que já sejam comerciais e bem estabelecidas, visando atender a quantidade de resíduos gerados (que pode ser um limitante, pois é considerado uma escala pequena), a agregação de valor à operação da serraria, a manutenção na contratação de mão-de-obra e a viabilidade econômica.

A primeira alternativa a ser considerada é o aproveitamento energético dos resíduos, podendo gerar energia térmica e elétrica a partir de cogeração pelo ciclo *Rankine*. Assim, a partir da aquisição de uma caldeira, uma turbina e um microgerador, os resíduos poderão ser queimados na própria serraria, produzindo a energia necessária para a sua operação e vendendo o excedente para a concessionária local, gerando receita adicional para o empreendimento.

Nessa alternativa, será adquirido também uma estufa para a secagem da madeira serrada, o que diminuiria drasticamente o tempo de secagem com maior controle da qualidade dos produtos. Parte da queima dos resíduos seriam destinados para gerar a energia necessária para a operação da estufa e para essa alternativa deverá ser previsto a contratação de dois operadores para esse conjunto de equipamentos. A **Figura 19** apresenta o fluxograma simplificado da opção que contempla a geração de energia.

**Figura 19** Aproveitamento de resíduos para uso energético na serraria



Fonte: Elaboração própria

Como apresentado na **Figura 19**, pode-se observar o fluxograma simplificado do aproveitamento de resíduos para uso energético na serraria em que, após a operação de beneficiamento da madeira na serraria, são gerados 50,9 % de volume de resíduos e, com o objetivo de reaproveitar essa biomassa como combustível para a caldeira, anteriormente é passado pela etapa de moagem, para diminuir e uniformizar a granulometria visando aumentar a eficiência da queima. Na caldeira é gerado vapor e o calor será convertido em trabalho por uma turbina, transformando-se em energia elétrica por um gerador, a qual, por sua vez, pode ser utilizada na operação da serraria e, o seu excedente poderá ser comercializado e distribuído na rede local. Convém ressaltar que o vapor remanescente para a utilização na turbina será utilizado para a secagem das madeiras serradas na estufa.

Para o cálculo da produção de vapor pela caldeira, foram selecionados os seguintes parâmetros, de acordo com a **Tabela 05**.

**Tabela 05:** Parâmetros técnicos para o cálculo da produção de vapor na caldeira a partir dos resíduos da “Serraria do Gaúcho”.

Parâmetro	Valor	Unidade
PCI resíduo	13.495,45	Kj/kg
Biomassa Florestal (resíduos)	535	Kg/hora
Dias de operação	22	dias/mês
Entalpia Total	2721,10	kJ/kg

Fonte: Elaboração própria

O cálculo de produção de vapor na caldeira, a partir do resíduo do processamento primário da madeira na “Serraria do Gaúcho” foi efetuado segundo a Equação 05.

$$Q = m_v * (h_{TOT} - h_L) - \text{Equação (5)}$$

Em que:

$$Q = \text{calor (kJ/s)}$$

$$m_v = \text{vazão mássica de vapor produzido (kg/h)}$$

$$h_{TOT} = \text{entalpia total do vapor (kcal/kg)}$$

$$h_L = \text{entalpia da água de alimentação (kcal/kg)}$$

A caldeira deverá funcionar 24 horas por dia nos dias de funcionamento da serraria, totalizando 22 dias, ou 176 horas por mês, e 264 dias, ou 2112 horas por ano. Porém, a geração de resíduos só acontece durante 8 horas diárias. Portanto, a serraria gera em 8 horas um valor de 12.850 kg, ou seja, 535 kg/h (utilizados durante 24h) de resíduos com PCI de 13.495,45 kJ/kg (determinado no Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética no IPT) e essa vazão de biomassa será utilizada como combustível na caldeira. Desta forma, é possível gerar 2334,96 kg/h de vapor, sendo necessária uma capacidade calorífica de 1764,90 kJ/s para transformar água líquida a 50 °C e 12 bar em vapor superaquecido a 250°C e 12 bar. Para a equação 5 foram utilizadas suas respectivas entalpias (210,4 e 2931,5 kJ/kg), obtidas na Tabela de vapor da água.

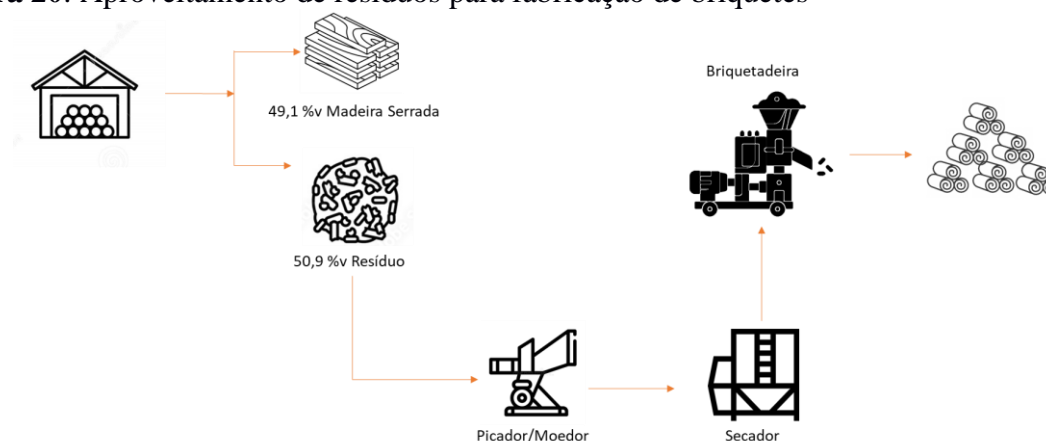
Com essa produção de vapor, será possível secar a madeira serrada na estufa (a ser adquirida nesse conjunto de equipamentos), gerar a energia que a serraria necessita para operar e, ainda comercializar o excedente para a rede de energia. Segundo o fabricante desse sistema, a caldeira tem capacidade para produzir 3000 kg de vapor por hora, mas, com a vazão mássica



de resíduos atual da serraria, é possível produzir aproximadamente 78% da capacidade máxima. Entre 20 e 25% desse vapor será direcionado para a secagem de madeira serrada e 75% a 80% para a geração de energia elétrica.

A segunda alternativa de aproveitamento contempla a aquisição de um picador/triturador para os resíduos de granulometria maiores, a fim de uniformizar o tamanho, aquisição de um secador para a biomassa e uma briquetadeira, para transformar os resíduos em briquetes, a partir da compactação da biomassa. Nessa alternativa, a operação da serraria continuaria funcionando normalmente e a novidade seria a diversificação das atividades, com a inclusão da produção e venda de briquetes. Os briquetes são constituídos de biomassa prensada e possuem poder calorífico superior ao da lenha, que pode substituir diversos combustíveis (SILVA *et al.*, 2017). Para essa opção seria necessário contratar um operador para a briquetadeira. A **Figura 20** apresenta o fluxograma simplificado da produção de briquetes com os resíduos da serraria.

**Figura 20:** Aproveitamento de resíduos para fabricação de briquetes



Fonte: Elaboração própria

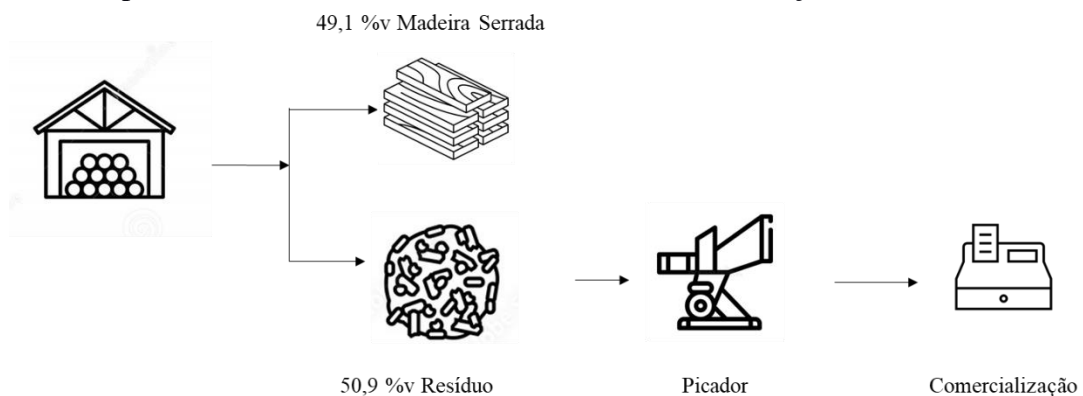
No mercado há diversos fabricantes de briquetadeiras e, para o volume gerado de resíduos na “Serraria do Gaúcho”, buscou-se por um modelo que pudesse atender tal capacidade, sendo encontrado um fabricante que comercializa equipamentos com capacidade de 800 kg/h. Além da briquetadeira, é necessário também a aquisição de um secador para a secagem da biomassa, pois essa tecnologia requer biomassa com teor de umidade entre 8 e 16% (PAULA, 2010) e granulometria fina. Então, torna-se necessário também a aquisição de equipamentos para moagem. A briquetadeira possui um sistema mecânico com pistão e a pressão exercida por ele é de 1200kgf/cm<sup>2</sup>.

No caso da “Serraria do Gaúcho”, 100% dos resíduos do tipo pó de serra ou serragem podem ser transformados em briquetes necessitando apenas de secagem. Os demais resíduos como costaneiras e aparas precisariam passar por moagem e secagem antes do processo de briquetagem em si. Como há a disponibilidade de resíduos no montante de 1600 kg/hora, que passará por secagem perdendo parte do peso, e depois se transformando em briquetes com capacidade de produção de 800 kg/hora.

Ressalta-se que tal alternativa necessitaria de diversificação das atividades da serraria, ampliando o portfólio, além da busca de clientes no município e em seu entorno.

A terceira alternativa para o aproveitamento dos resíduos gerados na serraria é a opção de comercializar a biomassa gerada na operação da serraria, ou seja, substituir a doação pela venda do resíduo. Para isso será necessário a aquisição de um picador para transformar os resíduos do tipo “costaneiras” em cavacos, não havendo a necessidade de contratação de pessoal, pois os mesmos funcionários que preparam os resíduos para doação, poderão preparar para venda. A **Figura 21** apresenta um fluxograma simplificado da comercialização dos resíduos. A venda dos resíduos transformados em cavacos também seria um novo produto no portfólio da serraria que teria que buscar compradores no município e em seu entorno.

**Figura 21:** Aproveitamento de resíduos na forma de comercialização



Fonte: Elaboração própria

## 5.7. ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DAS SOLUÇÕES DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA SERRARIA.

Após a definição das alternativas para aproveitamento dos resíduos, foi realizada uma ampla busca na internet por fabricantes e fornecedores no Brasil que pudessem oferecer equipamentos para atender a capacidade de geração de resíduos da “Serraria do Gaúcho”. Essa busca mostrou que a maioria dos fabricantes possuem equipamentos para escalas maiores,

acima de 5 toneladas/hora e, muitos não se interessam em “customizar” ou adaptar equipamentos para escalas menores, como é o caso da “Serraria do Gaúcho”, que apresenta uma geração de 1,60 toneladas de resíduos por hora. Essa “baixa” geração de resíduos é vista como um desafio e pode não viabilizar a aplicação de soluções para o seu aproveitamento, em especial pela questão do alto investimento para empresas de pequeno porte.

Assim, poucos fabricantes retornaram com cotações e possibilidades de adaptações para o atendimento da escala proposta e, ainda solicitaram confidencialidade para os seus nomes. Então, para cada alternativa será mencionado “Fabricante A”, “Fabricante B” e “Fabricante C”.

Para a análise de pré-viabilidade econômico-financeira das alternativas, foram considerados três modelos de receitas:

1. Modelo 1: venda de madeiras, considerando vendas adicionais por ano (em quantidade), valor agregado (em R\$) da madeira que passará por secagem artificial e comercialização de energia.
  - a. Neste modelo, parte-se do pressuposto de que a madeira seca, por ter um período de secagem menor e uma qualidade maior, pode auferir vendas adicionais e valor agregado maior do que a madeira atualmente vendida pela serraria.
  - b. Além das receitas citadas no item “a”, este modelo pode trazer benefícios em economicidade de energia para a organização.
  
2. Modelo 2: Comercialização de briquetes
  - a. Trata-se de um modelo de negócios novo para a Serraria, que pode gerar uma fonte de receitas ainda não contemplada na operação atual da organização.
  
3. Modelo 3: Comercialização de biomassa
  - a. Assim como o item “2”, a venda de biomassa é uma nova fonte de receitas para a Serraria.

Deve ser ressaltado que estes modelos se basearam apenas no impacto gerado ao negócio a partir das modificações propostas pela presente pesquisa. Sendo assim, não foram considerados os indicadores econômico-financeiros atuais da empresa. Diante disso, os dados econômico-financeiros dos três modelos são apresentados a seguir.

*Modelo 1: Modelagem dos dados de entrada do fluxo de caixa:* para este modelo, foram considerados os dados de investimento em bens de capital (CAPEX) do picador, caldeira, turbina, gerador e estufa de secagem, que serão utilizados no tempo 0 do fluxo de caixa como investimento a ser recuperado em um modelo de fluxo de caixa nominal. Os dados referentes à conta de energia elétrica são apresentados como um fator de economicidade mensal que será usado como entrada de receitas no modelo 1. Os dados de venda de energia elétrica (R\$/ mês), madeira serrada (m<sup>3</sup>/ ano) e preço da madeira serrada (preço unitário por m<sup>3</sup>) são dados de entrada de receita do fluxo de caixa. Por fim, o operador de caldeira, com salário baseado na mediana de mercado e regime de contratação por CLT, é considerado como um custo operacional adicional deste modelo de negócios. O resumo desses dados é apresentado na **Tabela 06**.

**Tabela 06:** Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo incluindo receitas de vendas de madeiras e energia elétrica (Modelo 1)

MODELO 1: MODELAGEM	VALOR	TIPO
Picador <sup>1</sup>	R\$ 80.000	CAPEX
Caldeira, turbina e gerador <sup>1</sup>	R\$ 5.000.000	CAPEX
Estufa de secagem <sup>1</sup>	R\$ 280.000	CAPEX
Energia elétrica <sup>2</sup>	R\$ 10.000	Receita (economicidade)
Venda de energia elétrica <sup>1</sup>	R\$ 35.000	Receita
Operador de caldeira <sup>3</sup> (mês)	R\$ 3.883	OPEX op
Madeira serrada (m <sup>3</sup> ano)	4035	Receita (quantidade)
Preço madeira serrada <sup>4</sup>	R\$ 5.250	Receita (preço m <sup>3</sup> )

**Fonte:** Elaboração própria, a partir de: 1: “Fabricante A”; 2: Serraria do Gaúcho; 3: Salário, 2023a e; 4: Cepea, 2022

Os dados apresentados na **Tabela 06** servem de entrada de dados para a **Tabela 07** (Modelagem do fluxo de caixa – Modelo 01), apresentado a seguir.

**Tabela 07:** Fluxo de caixa (Modelo 1)

MODELO 1: fluxo de caixa	Co nst ant e	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10
(+) venda de madeiras (m <sup>3</sup> add/ ano)	3,2 %		127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5
(+) valor agregado na madeira	3,9 %		R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456	R\$ 5.456
(+) venda de energia	12		R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0	R\$ 420.00 0
(=) receita bruta de vendas			R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743	R\$ 1.115. 743
(=) receita líquida de vendas	11, 20 %		R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0	R\$ 990.78 0
(-) OPEX operadores	24		R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201	R\$ 93.201
(-) CAPEX 1		R\$ 5.360. 000										
(+) economicidad e energia	12		R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0	R\$ 120.00 0
(=) Fluxo de caixa (livre)		-R\$ 5.360. 000	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578	R\$ 1.017. 578
(=) Fluxo de caixa (acum)		-R\$ 5.360. 000	-R\$ 4.342. 422	-R\$ 3.324. 844	-R\$ 2.307. 265	-R\$ 1.289. 687	-R\$ 272.10 9	R\$ 745.46 9	R\$ 1.763. 048	R\$ 2.780. 626	R\$ 3.798. 204	R\$ 4.815. 782

Fonte: Elaboração própria

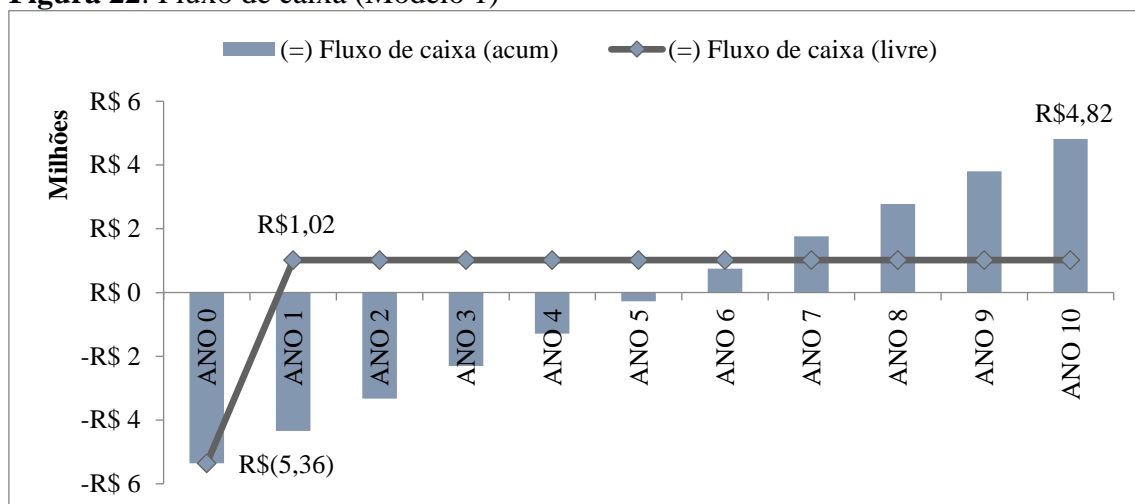
O fluxo de caixa apresentado na **Tabela 07** traz como aspectos principais os seguintes fatores:

- A premissa da venda de madeiras (m<sup>3</sup> adicionado por ano) corresponde a uma estimativa de vendas adicionais de madeiras a partir da diminuição do tempo de secagem e disponibilização mais ágil ao mercado do produto. Pode, ainda, representar vendas adicionais devido à exportação de um produto com maior qualidade para o mercado exterior. Sua métrica é dada pela quantidade de vendas atuais de madeira serrada (4.035 m<sup>3</sup>/ ano), mais o percentual mínimo estimado na coluna “constante” da **Tabela 07**;

- O valor agregado na madeira corresponde ao percentual agregado em valor ao m<sup>3</sup> da madeira (valor-base de R\$ 5.250,00), devido à maior qualidade do produto.
  - A quantidade adicional de madeiras vendidas multiplicada pelo valor final agregado ao m<sup>3</sup> da madeira corresponde à receita adicional com a madeira seca em estufa.
  - Os valores percentuais obtidos nas constantes são o mínimo em valor agregado e vendas adicionais de madeira para que o modelo seja economicamente viável.
- As constantes com valor “12” em vendas de energia elétrica e economicidade de energia (conta mensal) foram empregadas para adequar os valores mensais da **Tabela 07** de modelagem do modelo 1, para um fluxo de caixa anual, como o apresentado neste trabalho.
  - O percentual de 11,2% mostrado na receita líquida de vendas equivale à alíquota do SIMPLES Nacional e é aplicada sobre a receita bruta de vendas.
  - O “OPEX Operadores” recebe constante de 24 para (1) adequar os valores mensais da **Tabela 07** de modelagem do modelo 1 para um fluxo de caixa anual e (2) para contemplar os dois operadores necessários para as atividades previstas no modelo 1 de receitas.

A partir do fluxo de caixa do Modelo 1, apresentado na **Tabela 07**, tem-se a sua representação gráfica e seus indicadores econômico-financeiros, mostrados na **Figura 22** e na **Tabela 08**, respectivamente.

**Figura 22:** Fluxo de caixa (Modelo 1)



Fonte: Elaboração própria

A partir da análise da **Figura 22** é possível destacar:

- O investimento necessário para o Modelo 1 operar é da ordem de R\$ 5,4 milhões e está expresso no ano 0 do fluxo de caixa.
- Considerando as entradas (venda de madeira, de energia elétrica e economia de energia elétrica) e saídas de caixa (OPEX, além do CAPEX no t0), o retorno do investimento (*payback*) se dará no ano 6.
- A média de entrada de receitas é da ordem de R\$ 1 milhão ao ano.
- O fluxo de caixa acumulado ao fim de 10 anos é de pouco mais de R\$ 4,8 milhões.

Portanto, os indicadores econômico-financeiros do Modelo 1 são mostrados na **Tabela 08**.

**Tabela 08:** Indicadores econômico-financeiros (Modelo 1)

MODELO 1: INDICADORES	VALOR
VPL	R\$ 1
TMA	13,75%
TIR	13,75%
PAYBACK	5,3

**Fonte:** Elaboração própria

Pela **Tabela 08**, é possível concluir que o Modelo 1, que prevê a aquisição de estufa de secagem para a madeira serrada, agregando melhorias à qualidade da madeira, em menor prazo e transformando a serraria autossuficiente em energia, com venda do excedente para a rede, só será viável com o consequente incremento nas vendas de madeira (a partir de 3,2%) e aumento no valor de venda da madeira a partir de 3,9% em relação ao valor de venda atual. Se o modelo depender somente da economia de energia elétrica pela Serraria e da venda do excedente, o Modelo 1 não se apresenta viável.

*Modelo 2: Modelagem dos dados de entrada do fluxo de caixa:* para este modelo, foram considerados os dados de investimento em bens de capital (CAPEX) do picador, do moinho, do secador e briquetadeira, além do preço da tonelada do briquete (R\$ 750,00), produção mensal de briquete e custo mensal de um operador de briquetadeira. Esses dados são apresentados na **Tabela 09**.

**Tabela 09:** Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo de receitas de vendas de briquetes (Modelo 2)

MODELO 2: MODELAGEM	VALOR	TIPO
Picador <sup>1</sup>	R\$ 80.000	CAPEX
Moinho <sup>1</sup>	R\$ 135.000	CAPEX
Secador e briquetadeira <sup>1</sup>	R\$ 1.518.000	CAPEX
Tonelada de briquete <sup>2</sup>	R\$ 750	preço unit
Produção Briquete/ mês	140	produção
Operador briquetadeira <sup>3</sup> (mês)	R\$ 3.339	OPEX

**Fonte:** Elaboração própria, a partir de: 1: “Fabricante B”; 2: Grupo MF Rural, 2023a; 3: Salário, 2023b

Os dados apresentados na **Tabela 09** (Modelagem do fluxo de caixa – Modelo 2): servem de entrada para os dados apresentados na **Tabela 10**, apresentados a seguir.

**Tabela 10:** Fluxo de caixa (Modelo 2)

MODEL O 2: fluxo de caixa	constante	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10
(=) venda de briquetes	12		R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000	R\$ 1.260.000
(=) receita líquida de vendas	11,20 %	R\$ -	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880	R\$ 1.118.880
(-) OPEX operador briquetadeira	12		R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072	R\$ 40.072
(-) CAPEX 2		R\$ 1.733.000										
(=) Fluxo de caixa (livre)		-R\$ 1.733.000	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808	R\$ 1.078.808
(=) Fluxo de caixa (acum)		-R\$ 1.733.000	-R\$ 654.192	R\$ 424.616	R\$ 1.503.423	R\$ 2.582.231	R\$ 3.661.039	R\$ 4.739.847	R\$ 5.818.655	R\$ 6.897.462	R\$ 7.976.270	R\$ 9.055.078

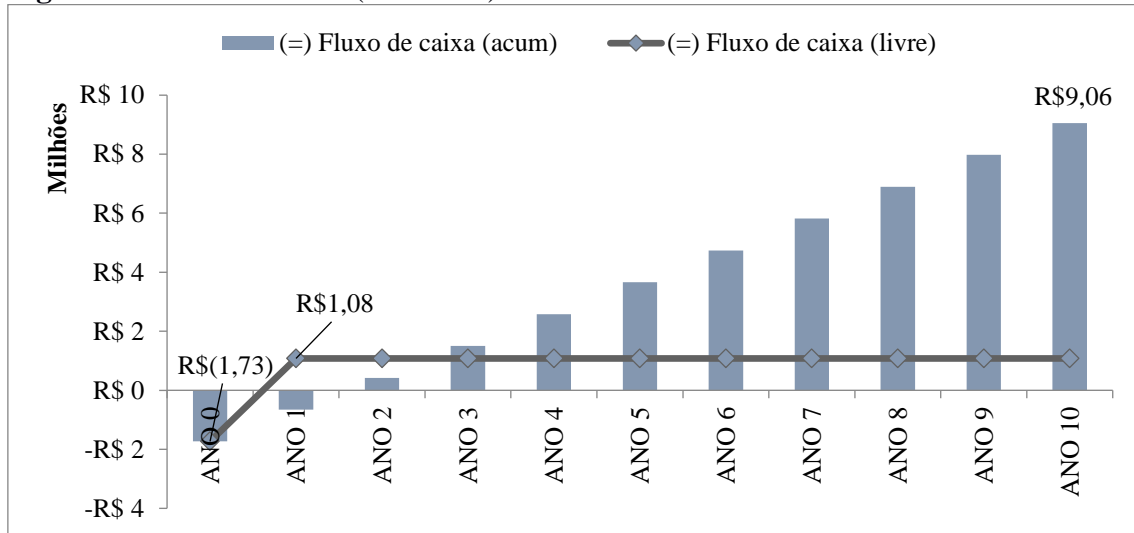
**Fonte:** Elaboração própria

O fluxo de caixa referente ao Modelo 2, tem como entrada de receitas a multiplicação da produção mensal de briquetes por 12 e pelo preço da tonelada do briquete. Essa é a única



entrada de receitas do modelo. Como saídas de caixa, tem-se o salário anual do operador de briquetadeira e os investimentos no ano 0 dos equipamentos identificados como CAPEX na **Tabela 09**. O fluxo de caixa do modelo 2 gera a seguinte representação gráfica (**Figura 23**).

**Figura 23:** Fluxo de caixa (Modelo 2)



**Fonte:** Elaboração própria

A partir da análise da **Figura 23** é possível destacar as seguintes informações:

- O CAPEX no ano 0 é da ordem de R\$ 1,7 milhão.
- Um fluxo de caixa constante pouco superior a R\$ 1 milhão.
- *Payback* no ano 2 de operação deste modelo de receitas.
- Fluxo de caixa acumulado ao fim de 10 anos de cerca de R\$ 10 milhões.

Portanto, o fluxo de caixa do modelo de vendas de briquetes possui os seguintes indicadores econômico-financeiros (**Tabela 11**).

**Tabela 11:** Indicadores econômico-financeiros (Modelo 2)

MODELO 2: INDICADORES	VALOR
VPL	R\$ 3.949.522
TMA	13,75%
TIR	62%
PAYBACK	1,6

**Fonte:** Elaboração própria

Com base nos indicadores econômico-financeiros apresentados na **Tabela 11** para o Modelo 2, a comercialização de briquetes é viável. Entretanto, é necessário considerar que o

modelo de vendas de briquetes é novo e deverá enfrentar barreiras comerciais de aceitação, uma vez que o público atual da Serraria recebe gratuitamente a biomassa da própria empresa. Então, é provável que o potencial de vendas de briquetes seja menor do que os apresentados neste modelo, que deve ser visto como um cenário econômico otimista.

*MODELO 3: Modelagem dos dados de entrada do fluxo de caixa:* para este modelo, foram considerados os dados de investimento em bens de capital (CAPEX) para o picador (R\$ 80.000,00), preço da tonelada de biomassa (R\$ 280,00) e produção diária e mensal de biomassa. Esses dados são apresentados na **Tabela 12**.

**Tabela 12:** Modelagem de dados para fluxo de caixa do modelo de receitas de venda de biomassa (Modelo 3)

<b>MODELO 3: MODELAGEM</b>	<b>VALOR</b>	<b>TIPO</b>
Picador <sup>1</sup>	R\$ 80.000	CAPEX
Tonelada de biomassa <sup>2</sup>	R\$ 280,00	receita
Produção biomassa ton/ dia	12	produção
Produção biomassa ton/ mês	264	produção

**Fonte:** Elaboração própria a partir de 1: “Fabricante C”; 2: Grupo MF Rural, 2023b

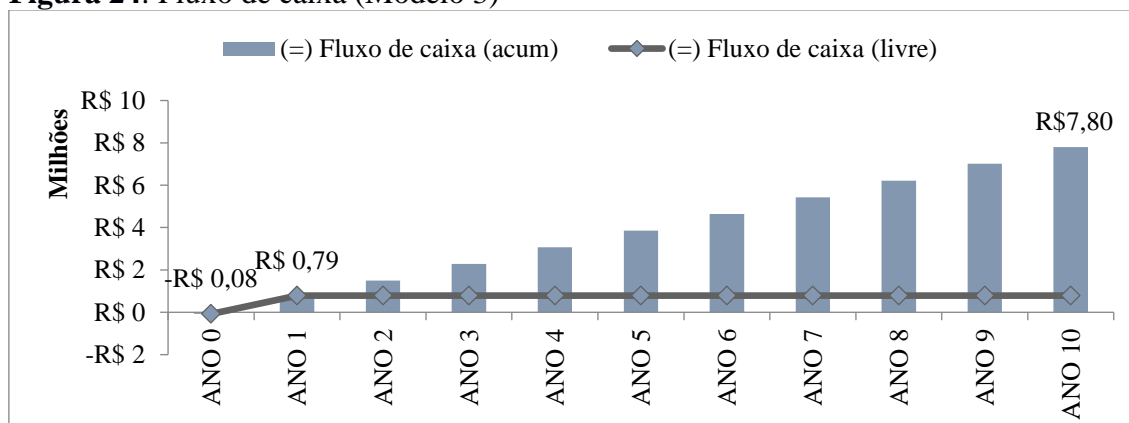
Os dados apresentados na **Tabela 12** (Modelagem do fluxo de caixa – Modelo 3) servem de entrada para os dados apresentados na **Tabela 13** apresentados abaixo.

**Tabela 13:** Fluxo de caixa (Modelo 3)

MODELO 3: fluxo de caixa	constante	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10
(=) venda de biomassa	12		R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040	R\$ 887.040
(=) receita líquida de vendas	11,2%	R\$ -	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692
(-) CAPEX 3		R\$ 80.000										
(=) Fluxo de caixa (livre)		-R\$ 80.000	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692	R\$ 787.692
(=) Fluxo de caixa (acum)		-R\$ 80.000	R\$ 707.692	R\$ 1.495.383	R\$ 2.283.075	R\$ 3.070.766	R\$ 3.858.458	R\$ 4.646.149	R\$ 5.433.841	R\$ 6.221.532	R\$ 7.009.224	R\$ 7.796.915

Fonte: Elaboração própria

O fluxo de caixa apresentado na **Tabela 13** possui como dados de entrada a receita de vendas com biomassa (vendas mensais \* 12 \* preço da tonelada de biomassa), descontados os respectivos impostos de 11,2% (com resultante na receita líquida de vendas) e o CAPEX da aquisição do picador. O fluxo de caixa do modelo 3 de vendas de biomassa gera a representação gráfica mostrada na **Figura 24**.

**Figura 24:** Fluxo de caixa (Modelo 3)

Fonte: Elaboração própria

A partir da análise da **Figura 24** é possível destacar as seguintes informações:

- CAPEX no ano 0 de R\$ 80 mil;
- Um fluxo de caixa constante de aproximadamente R\$ 790 mil;
- *Payback* no ano 1 de operação;
- Fluxo de caixa acumulado ao fim de 10 anos de cerca de R\$ 7,8 milhões.

Portanto, o fluxo de caixa do modelo de vendas de biomassa possui os seguintes indicadores econômico-financeiros (**Tabela 14**).

**Tabela 14:** Indicadores econômico-financeiros (Modelo 3)

MODELO 3: INDICADORES	VALOR
VPL	R\$ 4.069.094
TMA	13,75%
TIR	985%
PAYBACK	0,1

**Fonte:** Elaboração própria

Embora os números apresentados na **Tabela 14** de indicadores econômico-financeiros sejam excelentes, deve-se adotar extrema cautela ao tomar tal análise como determinante em uma tomada de decisão. Em primeiro lugar, tais indicadores são influenciados pelo baixo CAPEX (R\$ 80.000) e pela ausência de OPEX adicional para a venda de biomassa. Portanto, o fluxo de caixa possui pouquíssimas saídas de receitas. Em segundo lugar, o público-alvo hoje da empresa recebe de maneira inteiramente gratuita a biomassa e seria improvável que 100% desse público passasse a pagar pela biomassa eventualmente vendida pela Serraria em um possível novo modelo de negócios. Logo, a entrada de receitas deste modelo encontra-se em um teto, no cenário mais otimista possível.

5.7.1. Considerações sobre a avaliação econômico-financeira preliminar das soluções de aproveitamento de resíduos da serraria.

Os três modelos apresentados possuem pontos fortes e pontos fracos que podem resumidos de maneira análoga ao apresentado no **Quadro 04**.

**Quadro 04:** Pontos fortes e pontos de atenção das 03 soluções para aproveitamento de resíduos

<b>Modelo</b>	<b>Pontos fortes</b>	<b>Pontos de atenção</b>
1 – venda de madeira e energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto de maior valor agregado e com potencial de exportação;</li> <li>• Potencial incremento exponencial em vendas devido ao menor tempo de secagem;</li> <li>• Empresa autossustentável em termos de energia;</li> <li>• Possibilidade de venda de energia elétrica para a rede.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAPEX alto, especialmente na aquisição de caldeira, turbina e gerador. Para minimizar esse risco, recomenda-se a busca pela combinação de fomentos reembolsáveis e não-reembolsáveis.</li> <li>• A venda de energia elétrica e a sua economia por si só não geram indicadores positivos de viabilidade econômica</li> </ul>
2 – venda de briquetes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bom potencial econômico-financeiro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco comercial, já que o público pode não querer pagar pelo produto .</li> <li>• Secador e briquetadeira: recomenda-se o uso de recursos reembolsáveis e não-reembolsáveis para a sua aquisição</li> </ul>
3 – venda de biomassas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente potencial econômico;</li> <li>• Não exige a contratação de mão de obra adicional;</li> <li>• CAPEX baixo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco comercial: público da empresa já recebe biomassa sem custos e poderia migrar para outros fornecedores</li> <li>• Potencial de mercado pode estar superestimado</li> </ul>

**Fonte:** Elaboração própria

Como se trata de uma análise de pré-viabilidade econômico-financeira, foi realizado um levantamento preliminar dos aspectos econômicos e financeiros que podem impactar nos três modelos de receitas para a serraria. Como limitações, é preciso apontar que se trata de um estudo determinístico e que análises mais aprofundadas poderiam ser feitas em modelos probabilísticos, com a criação de cenários e probabilidade de ocorrência de eventos técnicos, econômicos e comerciais, que poderiam afetar os modelos de receitas da Serraria. Portanto,

trata-se de um estudo exploratório que pode servir de base para outras análises específicas sobre cada um dos modelos de operação da organização no que se refere aos seus modelos de receitas, sob o ponto de vista econômico-financeiro.

Destaca-se ainda que uma forma de viabilizar os investimentos necessários para a aquisição dos equipamentos é identificar linhas de crédito e fomentos reembolsáveis e não reembolsáveis, que são específicos para esse tipo de empreendimento. Há opções para fazer todo o desenvolvimento do Projeto, buscando a solução tecnológica mais adequada para empresas de pequeno porte que precisam fazer a correta destinação de seus resíduos e ainda agregar valor, como os fomentos ligados à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) que possui linhas específicas com foco na bioeconomia da Amazônia (Embrapii, 2023). Na linha de P&D há também o Programa de Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel que por meio da Lei 9991 de 2000 determina que as empresas autorizadas, permissionárias e concessionárias do setor de energia elétrica precisam aplicar anualmente um percentual de sua Receita Operacional Líquida – (ROL) em P&D e, a concessionária de energia elétrica do Pará é o Grupo Equatorial Energia.

Já o Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) possui linhas de financiamento, como o FINAME (2023), para financiamento de máquinas e equipamentos, além de possuir outras alternativas para diversos temas, como a economia de baixo carbono.

Há também linhas de suporte do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae), que está presente em todos os estados brasileiros, e poderá dar suporte na elaboração de um Plano de Negócios que vise a inserção de novos negócios ao portfólio da Serraria, a exemplo da comercialização de briquetes ou a venda da biomassa “in natura”.

Temas como bioeconomia, economia circular, descarbonização, economia de baixo carbono, transição energética, entre outros, que objetivam a redução da emissão de gases de efeito estufa e amenizando os impactos das mudanças climáticas, são temas chaves em diversos editais de pesquisa, linhas de fomento e crédito para empresas e, com apoio de universidades e instituições de pesquisa para elaborar bons projetos, empresas como a Serraria do Gaúcho podem desenvolver soluções específicas para as suas necessidades ou podem se unir em consórcios para desenvolverem soluções coletivas, visando soluções mais complexas para a gestão de seus resíduos.

## 6 CONCLUSÕES

A presente tese estudou a geração de resíduos e opções de reaproveitamento gerando benefícios técnicos, econômicos e ambientais em uma serraria localizada no município de Santarém, no Pará (Serraria do Gaúcho), segundo maior produtor sustentável de madeira em tora na região da Amazônia Legal. Nesse estudo foi possível compreender a origem da madeira extraída mostrando que Planos de Manejo Florestal Sustentável são importantes instrumentos para o uso racional da floresta e o desenvolvimento sustentável da região.

Os Planos de Manejo Florestal Sustentável em conjunto com programas de certificação florestal são importantes instrumentos de agregação de valor à bioeconomia brasileira, indicando que é possível extrair madeira de forma racional e sustentável.

O Brasil apresenta um grande potencial de aproveitamento energético de resíduos florestais e madeireiros que são gerados em diferentes elos das cadeias produtivas, carecendo, no entanto, de soluções tecnológicas adaptadas para diferentes escalas de produção.

Os resíduos madeireiros gerados a partir do processamento primário (desdobro) de madeiras no território da Amazônia Legal poderiam contribuir para o abastecimento de energia elétrica necessária para a demanda dos sistemas isolados substituindo combustíveis de origem fóssil por renováveis, colaborando ainda para atingir as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial o número 7 que trata do acesso à energia de forma acessível e renovável. Foi realizada caracterização físico-química de uma amostra de serragem colaborando com o planejamento do aproveitamento energético dos resíduos na escolha das tecnologias mais adequadas.

A estimativa de produção de madeira serrada na “Serraria do Gaúcho” por mês foi calculada em 333,23 m<sup>3</sup>, com geração de 348,61 m<sup>3</sup> de resíduos, que tem como estimativa de potencial de geração de energia elétrica na ordem de 0,27 MW por ano e 0,02 MW por mês, sendo a estimativa de energia elétrica disponível calculada de 1.912,89 MWh por ano e 159,41 MWh por mês. Essa baixa estimativa está ligada ao baixo volume mensal de resíduos gerados, que para a serraria foi em torno de 348,61 m<sup>3</sup>, equivalente a produção de 333,23 m<sup>3</sup> de madeira serrada por mês.

Ressalta-se que há uma gama de tecnologias possíveis para aproveitamento energético de resíduos, como o da biomassa florestal, porém as tecnologias como gaseificação, pirólise rápida, combustão, compactação entre outras estão em níveis de maturidade tecnológica diferentes e muitos fabricantes não visualizam viabilidade em pequenas escalas.

A avaliação econômico-financeira preliminar mostrou que mesmo o investimento na aquisição de equipamentos (caldeira, turbina e gerador) para geração de energia elétrica sendo alto, ainda é uma boa alternativa, adicionando a estufa de secagem que melhorará a qualidade dos produtos e poderá, conseqüentemente, aumentar o volume de vendas, além de tornar a serraria autossuficiente em energia, a partir de fonte renovável. A alternativa relacionada à geração de energia tem o maior CAPEX no valor de R\$ 5.360.000,00. A opção de produção e comercialização de briquetes teve o seu CAPEX total em R\$ 1.518.000,00 e, a terceira alternativa, a substituição da doação da biomassa pela venda, apresentou o menor CAPEX no valor de R\$ 80.000,00. Entende-se que mesmo com valores de CAPEX menores, as alternativas relacionadas à produção e venda de briquete e venda de biomassa encontrariam dificuldades, porque, atualmente, a serraria faz a doação do resíduo e o mercado local poderia não aceitar ter que comprar a matéria-prima.

Dentre as dificuldades encontradas para a realização desse trabalho, destaca-se a pandemia de COVID-19 que suscitou em atrasos na coleta e levantamento de dados de campo. Além disso, houve dificuldade em identificar empresas como a Serraria do Gaúcho dispostas a apresentar os seus dados para a pesquisa, o mesmo acontece com os fabricantes de equipamentos que preferem não se identificar e solicitam confidencialidade.

Por fim, como sugestões para trabalhos futuros pode-se mencionar:

- Identificar e mapear o mercado consumidor de biomassa na região da Amazônia Legal, buscando conectar demanda com oferta de resíduos;

- Mapear o potencial de geração de energia elétrica, a partir de levantamento de serrarias que fazem o processamento primário de madeira na Amazônia, buscando identificar quais possuem reaproveitamento dos resíduos e, quais não possuem;

- Mapear e identificar incentivos econômicos para implantação de tecnologias para aproveitamento energético em serrarias e empreendimentos correlatos;

- Desenvolver soluções tecnológicas de menor custo para o aproveitamento energético de resíduos madeireiros gerados em empreendimentos de pequena escala;

- Realizar estudos de viabilidade econômica baseados em modelos probabilísticos, com a criação de cenários e probabilidade de ocorrência de eventos técnicos, econômicos e comerciais, para uma melhor avaliação da implantação de soluções tecnológicas para o aproveitamento de resíduos em empreendimentos de pequeno porte;

- Com estudos extrapolados para uma realidade maior, buscar viabilidade para criação de políticas públicas de estímulo ao aproveitamento energético a partir de biomassa na região da Amazônia.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz por origem de combustível**. ANEEL, 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYyYjQ0YWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 02 mar. 2023.

AKPOOTU, D. O.; MUHAMMAD, S. B.; SHARAF, A.; BALA, F.; SANI, S. O.; YASUF, C.; AJAEROH, C. Comparative analysis on the performance of four selected fuel wood stoves using water boiling test. **The International Journal of Engineering and Science**, v. 3, p. 26-30, 2014.

ALMEIDA, B. C. **Contribuição para melhoria do processo de secagem convencional de madeiras serradas na região norte do Estado do Mato Grosso**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ALMEIDA, M. B. B. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana de açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) –Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ALVES, H. J. Tecnologias de produção de hidrogênio. *In: Disciplina de combustíveis e biocombustíveis*. Foz do Iguaçu: UFPR, 2018. 71 slides. Disponível em: <https://palotina.ufpr.br/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Aula-Hidrog%C3%AAnio-Prof.-Helton-Jos%C3%A9-Alves.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84**. Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2013a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, PA, USA, 2013b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3172**. Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2013c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3176-15**. Standard Practice for Ultimate Analysis of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4239**. Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5373**. Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5865/D5865M**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E871-82**. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 2013d.

ANATER, M. J. N. **Desempenho Ambiental e Energético da produção de carvão vegetal para uso doméstico no Brasil**. 2022. 157 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Financiamento de máquinas e equipamentos**. Disponível em: [https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-todos\\_](https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-todos_) Acesso em: 15 abr. 2023.

BAQUIÉ, S.; URPELAINEN, J. Access to modern fuels and satisfaction with cooking arrangements: survey evidence from rural India. **Energy for Sustainable Development**, v. 38, p. 34–47, 2017.

BARBELI, M. C. **Possibilidades e perspectivas do uso de cogeração de energia no setor de papel e celulose no Brasil**. Disponível em: [pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/viewFile/2371/2275](http://pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/viewFile/2371/2275). Acesso em: 20 jan. 2022.

BENTSEN, N. S.; FELBY, C. **Technical potentials of biomass for energy services from current agriculture and forestry in selected countries in Europe**. Copenhagen: The Americas and Asia. Forest & Landscape, University of Copenhagen, 2010. 31 p. (Working Papers / Forest & Landscape; n. 55).

BIOENERGY CROPS. **Best examples on how biomass can avoid deforestation and improve food security**. Disponível em: <http://bioenergycrops.com/blog/2013/09/12/biomass-stoves/>. Acesso em: 14 jan. 2018.

BRAGA, R. N. **Pirólise rápida catalítica do capim elefante utilizando materiais mesoporos e óxidos metálicos para deoxigenação em bio-óleo**. 202 f. Tese (Doutorado). Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia do Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, 2012.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRASIL. Decreto Federal nº 5.975, de 30 de novembro de 2006. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4º, inciso III, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2º da Lei no 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos Decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 dez. 2006. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/decreto/d5975.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5975.htm). Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Instrução Normativa MMA nº 1, de 12 fevereiro de 2015. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS da Caatinga e suas formações sucessoras, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 fev. 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=78154>. Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Instrução Normativa MMA nº 4, de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a Autorização Prévia à Análise Técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável-APAT, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 dez. 2006. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=76721>. Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Instrução Normativa MMA nº 5, de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 dez. 2006. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/IN0005-111206.PDF>. Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 dez. 2011. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/lcp140.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm). Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Lei Federal nº 11.284, de 02 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nºs 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 mar. 2006. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/11284.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11284.htm). Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Lei Federal nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 set. 1965. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4771.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm). Acesso em: 21 set. 2022.

BRASIL. Lei nº 9991 de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 jul. 2000.

BRAZ, R. L.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; BECKER, G.; DA SILVA, D. A.; SILVA, D. A. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia—uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 5, n. 2, p. 168-181, 2014.

BRAZ, R. L.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; BECKER, G.; SILVA, D. A. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v.5, n. 2, p. 168-181, 2014.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, n. 3, p. 68-94, Mar. 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755-1768, 2006.

BRITO, J. O. Uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p.185-193, 2007. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS**: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Edições Câmara, 2010. 52 p. (Série legislação; n. 48)

CARVALHO, F. M.; ANDRADE, D. F. C.; SILVA RIBEIRO, R. B.; DANTAS J. Aproveitamento de galhos – resíduo florestal – como estratégia de geração de emprego e renda na Flona Tapajós. *In*: SEMINÁRIO DE PRÁTICAS INOVADORAS NA GESTÃO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO, 1., 2014. **Abstracts [...]**. [S.l.]: ICMBIO, 2014. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/praticasinovadoras/images/stories/praticas/2014-20/ficha.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

CARVALHO, M. M. O. **Comparação de tecnologias de gaseificação de biomassa para substituição do gás natural em plantas de pelletização de minério de ferro**. 2014. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA AVANÇADA. **Informativo Cepea – Setor Florestal**, n. 246, p. 1-12, jun. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0263561001658494028.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Energias do Futuro**. Relatório Final. Brasília: CGEE, 2008. 139 p. Disponível em: [https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Energias+do+Futuro+Final+V6\\_19\\_07\\_2008\\_4627.pdf/38a82ffe-5af4-4e8b-8b57-5cfe5d57fbaf?version=1.0](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Energias+do+Futuro+Final+V6_19_07_2008_4627.pdf/38a82ffe-5af4-4e8b-8b57-5cfe5d57fbaf?version=1.0). Acesso em: 20 jan. 2022.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Comparação entre tecnologias de gaseificação existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte. Estado da arte da gaseificação**. São Paulo: CENBIO, 2002. 108 p.

CHEN, Q. *et al.* Household biomass energy choice and its policy implications on improving rural livelihoods in Sichuan, China. **Energy Policy**, v. 93, p. 291–302, 2016.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P. Geração de eletricidade em comunidades isoladas a partir de resíduos de biomassa: uma opção para a região amazônica. **Inclusão Social**, Brasília, DF, v. 12, n. 1, p. 208-212, jul./dez. 2018.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M.; ESCOBAR, J. F.; PERECIN, D.; SOUZA, D. B. Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo. São Paulo: IEE-USP, 2020. 242 p.

COELHO, S. T.; LECOCQ, F.; CORTEZ, C.; BARBIER, C.; TUDESCHINI, L. G. Fuel wood consumption in Brazilian residential sector, energy consumption in households and carbon footprint of development in selected Brazilian regions, comparing Brazil and France. *In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION*, 22., 2014, Florence. **Proceedings [...]**. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; 2014. p. 1475–1479.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 06 fev. 2009a.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 411, de 06 de maio de 2009. Dispõe sobre procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos florestais madeireiros brutos e processados de origem nativa. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 08 maio 2009b.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 474, de 06 de abril de 2016. Altera a Resolução no 411, de 6 de maio de 2009, que dispõe sobre procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros de origem nativa, bem como os respectivos padrões de nomenclatura e coeficientes de rendimento volumétricos, inclusive carvão vegetal e resíduos de serraria, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 maio 2016.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. L. (org.). **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

CUTZ, L. *et al.* Switching to efficient technologies in traditional biomass intensive countries: The resultant change in emissions. **Energy**, v. 126, p. 513-526, 2017.

DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M. Resíduos de indústria madeireira: Caracterização, Consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, n. 05, p. 1-19, jan. 2005. 19p.

DUVAL, A.; LAWOKO, M. A review on lignin-based polymeric, micro- and nano-structured materials. **Reactive and Functional Polymers**, v. 85, p. 78-96, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Área de Reserva Legal – ARL**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/codigo-florestal/area-de-reserva-legal-arl>. Acesso em: 10 out. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Rede MCTI/Embrapii de Inovação em Bioeconomia**. Disponível em: <https://embrapii.org.br/redes-embrapii/rede-mcti-embrapii-de-inovacao-em-bioeconomia/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2022: Ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. 264 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Brasília: EPE, 2021. (Nota Técnica n. 003). Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\\_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 02 mar. 2023.

EOM, I. Y. *et al.* Characterization of primary thermal degradation features of lignocellulosic biomass after removal of inorganics metals by diverse solvents. **Bioresource Thecnology**, Essex, v. 102, n. 03, p. 3437-3444, Mar, 2011.

ESCOBAR, F. J. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira**. 2016. 122 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Energia e Ambiente, Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

FOELKEL, C. **Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade**. Parte 2: geração de calor, vapor e eletricidade. Celsius Degree, 2016. Disponível em: [http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44\\_Geracao\\_Calor\\_Vapor\\_Eletricidade.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44_Geracao_Calor_Vapor_Eletricidade.pdf). Acesso em: 20 jan. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Global Forest Resources Assessment 2020: Key findings**. Rome: FAO, 2020. 16 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/CA8753EN/CA8753EN.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Perdas e desperdícios de alimentos na América Latina e no Caribe**. Disponível em: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/239394/>. Acesso em: 12 nov. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of the world's forest – Forest Pathways to sustainable development**. Rome: FAO, 2018. 139 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/I9535EN/i9535en.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2018.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL. **Public Project Certificate Search**. FSC, 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiN2U3NGMyNWVtZTAxNS00MzVhLWVxNmMtOThhZjdiYjQ4MWNkLiwidCI6IjEyNGU2OWRiLWVmNjUtNDk2Yi05NmE5LTVkNTZiZWxMxZDI5MSIsImMiOjI9&pageName=ReportSectiond3a8bbd5945a404c5b97>. Acesso em: 20 nov. 2022.

FOREST STEWARDSHIP COUNCIL. **Tipos de Certificação**. [S. l.]: FSC, 2022. Disponível em: <https://br.fsc.org/br-pt/certificacao/tipos-de-certificacao>. Acesso em: 01 mar. 2022.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 101-106, maio/jul. 2010.

GARCIA, A.; SILVA, A. P. S.; MENDONÇA, M. A.; ALVES, V. R. S. Caracterização de biomassas para o processo de pirólise rápida. *In*: CONGRESSO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2021, Sorocaba, São Paulo. **Anais [...]**. [S.l.: s. n], 2021. 12 p.

GLASS, S. V.; ZELINKA, A. L. **Moisture relations and physical properties of wood**. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 20 p. (General Technical Report FPL- GTR. 190).

GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP. **Towards sustainable modern wood energy development**. Berlin: GEBP, 2014. 92 p.

GOMES, J. I. ; SAMPAIO, S. S. **Aproveitamento de resíduos de madeira em três empresas madeireiras do Estado do Pará**. [S.l.: s. n], 2004.

GOMES, J. I.; SAMPAIO, S. S. **Aproveitamento de resíduos de madeira em três empresas madeireiras do Estado do Pará**. Belém: Embrapa, 2004. 5 p. (Comunicado Técnico 102).

GRUPO MF RURAL. **Biomassa de Madeira – Cavaco**. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/662635/biomassa-de-madeira-cavaco>. Acesso em; 15 abr. 2023b.

GRUPO MF RURAL. **Briquetes (Serragem de madeira)**. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/635050/briquetes-serragem-de-madeira>. Acesso em: 15 abr. 2023a.

IMAFLOA. **Relatório anual 2021**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/relatorio\\_anual\\_imaflora\\_2021.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/relatorio_anual_imaflora_2021.pdf). Acesso em: 01 mar. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual Iba 2022**: Ano base 2021. São Paulo: IBÁ, 2022. 96 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br.pesquisa/pevs/quadros/brasil/2021>. Acesso em: 15 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e Silvicultura 2021**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=sobre>. Acesso em: 10 nov. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras – Jarana**. Disponível em: [https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=67](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=67). Acesso em: 01 nov. 2022a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Informações sobre madeiras – Maçaranduba**. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/4.htm](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/4.htm). Acesso em: 01 nov. 2022b.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Estimativa por desmatamento por corte raso na Amazônia Legal para 2021 é de 13.235 km<sup>2</sup>**. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/divulgacao-de-dados-prodes.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Gasification of biomass and waste**. Task 33 Database. Disponível em: [http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal\\_gasification](http://task33.ieabioenergy.com/content/thermal_gasification). Acesso em: 10 nov. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of hydrogen**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf). Acesso em: 03 mar. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Paris: IEA, 2017.

JETTER, J. J.; KARIHER, P. Solid-fuel household cook stoves: characterization of performance and emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 294-305, 2009.

KAMM, B.; GRUBER, P. R.; KAMM, M.; KROMUS, S. Biorefinery systems – an overview. *In: Biorefineries – industrial process and products: status quo and future directions*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. v. 1, cap. 1.

KAREKESI, S. *et al.* Status of biomass energy in developing countries and prospects for international collaboration. **Global Forum on Sustainable Energy Bulletin International**, Institute for Sustainable Development, v. 93, n. 3, p.1-11, 2005. (Summary report). Disponível em: [http://s3.us-west-2.amazonaws.com/enb.iisd.org/archive/download/pdf/sd/ymbvol93num3e.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA6QW3YWTJ6YORWEEL%2F20230526%2Fus-west-2%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20230526T143626Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=60&X-Amz-Signature=8592d78326dd758554f236b5b8a0d4bd534d7fdf2d943d10af8c1fc406f3f08e](http://s3.us-west-2.amazonaws.com/enb.iisd.org/archive/download/pdf/sd/ymbvol93num3e.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA6QW3YWTJ6YORWEEL%2F20230526%2Fus-west-2%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20230526T143626Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=60&X-Amz-Signature=8592d78326dd758554f236b5b8a0d4bd534d7fdf2d943d10af8c1fc406f3f08e). Acesso em: 20 nov. 2022.



LAURICHESSE, S.; AVÉROUS, L. Chemical modification of lignins: towards biobased polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 7, p. 1266-1290, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.11.004>

LEITE, C. C.; SOUSA, V. **Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?** São Paulo: IEMA, 2020. 36 p. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/02/relatorio-amazonia-2021-bx.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2022.

LENTINI, M.; ANDRADE, M.; NUNES, F.; SANTOS, H. **Amazonas, o gigante florestal brasileiro: desafios e oportunidades para o uso e a conservação das florestas naturais de produção.** Piracicaba: Imaflora, 2021. (Boletim Timberflow 5).

LENTINI, M.; SOBRAL, L.; VIEIRA, R. **Como o mercado dos produtos madeireiros da Amazônia evoluiu nas últimas duas décadas (1998-2018)?** Piracicaba: Imaflora, 2020. 11 p. Disponível em: [https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/boletim\\_timberflow\\_2\\_abril\\_2020.pdf](https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/boletim_timberflow_2_abril_2020.pdf). Acesso em: 10 set. 2022.

LOPES F.S., MOULIN J.C., SANTOS L. J., GOMES T.O. e MOTTA J.P..Rendimento em madeira serrada de toras de pequeno diâmetro em serraria de grande porte. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS*, 3., 2018. **Anais [...]**. Recife: Cointer PDVAgro, 2018. 9 p. Disponível em: <https://cointer.institutoidv.org/inscricao/pdvagro/uploadsAnais/RENDIMENTO-EM-MADEIRA-SERRADA-DE-TORAS-DE-PEQUENO-DI%C3%82METRO-EM-SERRARIA-DE-GRANDE-PORTE.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; SANCHEZ, C. G.; GÓMEZ, E. O.; SALES, C. A. V. B. Gaseificação. *In: CORTEZ, L. A.B ; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. (org.). Biomassa para energia.* Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

MACCARTY, N. *et al.* A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. **Energy for sustainable development**, v. 12, n. 2, p. 56-65, 2008.

MAPBIOMAS. **Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil.** 2020. Disponível em: [mapbiomas.org](http://mapbiomas.org). Acesso em: 01 mar. 2022 .

MARQUES, M. H. B.; MARTINS V. A. **Secagem da madeira.** Brasília: LPF, 2002. 47 p.

MELO, J. E. **Madeira: características e aplicações.** Brasília: LPF, 2002. 30 p.

MENDONZA, Z. M. S. H.; EVANGELISTA, W. V.; ARAÚJO, S. O.; SOUZA, C. C.; RIBEIRO, F. D. L.; SILVA, J. C. Análise dos resíduos madeireiros gerados nas marcenarias do município de Viçosa - Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 755-760, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Acordo de Paris.** Brasília: MMA, 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 21 out. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Manejo Florestal Sustentável.** Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/florestas/manejo-florestal-sustent%C3%A1vel.html#:~:text=Manejo%20Florestal%20Sustent%C3%A1vel%20%C3%A9%20a,madeiras%20de%20m%C3%BAtiplos%20produtos%20e.> Acesso em: 01 set. 2022.

MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A. **Fast Pyrolysis and Bio-oil Production from Agricultural Residues and Energy Crops.** In: SYMPOSIUM ON BIOTECHNOLOGY FOR FUELS AND CHEMICALS, 30., 2008, New Orleans, LA. Posters ... Fairfax, VA: Society for Industrial Microbiology, 2008. Poster 4-47. Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66459617/Fast\\_Pyrolysis\\_and\\_Bio-oil\\_Production\\_fr20210421-10526-4rvokk.pdf?1619030620=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFast\\_pyrolysis\\_and\\_bio\\_oil\\_production\\_fr.pdf&Expires=1697400013&Signature=Gnb5aIr6G71RQU9OSRzIf8ShCm7cGtgRhvkuwvb3F6iNb3HCrF8tylhKSe1abLmodqHirA0wzc2PME5wkvuFZnLjXNM0~x10pIHdZ0Kb3EAZ364S6EaLXF0Adg6aynEIj12byWJAzbxD0FVrRPwzdVIAqFcM8jZ-OiZOApShotEvv7v1I6UlnCSDqxUpAP7RCmwlB2xIj9DnCTdG0olNzuP5QmJ4M11~x3Vgzac2ZSdgkc9qEQU9wXkAPYKSt9W6mbcjykJWsAl2NyZL6w3Lv0u5h6wPEgz2t8OhECz2bFzbtsumkOvagY3ilu9Hjgw7aDCbrMaag1YVucKFmBV0A\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66459617/Fast_Pyrolysis_and_Bio-oil_Production_fr20210421-10526-4rvokk.pdf?1619030620=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFast_pyrolysis_and_bio_oil_production_fr.pdf&Expires=1697400013&Signature=Gnb5aIr6G71RQU9OSRzIf8ShCm7cGtgRhvkuwvb3F6iNb3HCrF8tylhKSe1abLmodqHirA0wzc2PME5wkvuFZnLjXNM0~x10pIHdZ0Kb3EAZ364S6EaLXF0Adg6aynEIj12byWJAzbxD0FVrRPwzdVIAqFcM8jZ-OiZOApShotEvv7v1I6UlnCSDqxUpAP7RCmwlB2xIj9DnCTdG0olNzuP5QmJ4M11~x3Vgzac2ZSdgkc9qEQU9wXkAPYKSt9W6mbcjykJWsAl2NyZL6w3Lv0u5h6wPEgz2t8OhECz2bFzbtsumkOvagY3ilu9Hjgw7aDCbrMaag1YVucKFmBV0A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA) . Acesso em: 15 set. 2023.

NICAWE. Nicawe Equipamentos e Soluções para Indústria. **Quanto tempo demora a secagem de madeira?** 2020. Disponível em: <https://www.nicawe.com.br/quanto-tempo-demora-a-secagem-de-madeira/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

ODERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significante and impact. **Biomass & Bioenergy**, Amsterdam, v. 30, n. 11, p. 973-982, 2005.

OLIVEIRA, L. S. **Importância da secagem da madeira.** Projeto de extensão: Informes técnicos sobre secagem da madeira. [S.l.]: LASEMa – CEMG – UFPEL. 2021. 3 p. Disponível em <https://wp.ufpel.edu.br/lasema/files/2021/10/Informe-02-Importancia-da-secagem-da-madeira.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

OLIVEIRA, R. C. D. **Panorama do hidrogênio no Brasil.** Rio de Janeiro: Ipea, 2022. 61 p.

PARÁ (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará. **Instrução Normativa nº03, de 10 de outubro de 2017.** Institui o Calendário Florestal, no âmbito da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará - SEMAS, que define os períodos para a safra da exploração de madeira em florestas de terra firme e para o embargo das atividades de exploração florestal, no Estado do Pará, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/200.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2022.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PROGRAMA MADEIRA LEGAL. **Lenha Verde.** 2009. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/madeiralegal/2009/10/lenha-verde/> Acesso em: 20 maio 2023.

PROGRAMA MADEIRA LEGAL. **Madeira Legal vs Madeira Ilegal**. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/madeiralegal/madeira-legal-vs-madeira-ilegal/#:~:text=Para%20explora%C3%A7%C3%A3o%20de%20madeira%20legal,Autoriza%C3%A7%C3%A3o%20para%20Supress%C3%A3o%20da%20Vegeta%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 01 out. 2022.

QUENO, L. R. M. **Produção de pellets de madeira no Brasil: estratégia, custo e risco de do investimento**. 2015. 145 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991. 16 p.(IBAMA-LPF. Série técnica, n. 13).

RAMOS, W. F.; RUIVO, M. L. P.; JARDIM, M. A. G.; PORRO, R.; CASTRO, R. M. S.; SOUSA, L. M. Análise da indústria madeireira na Amazônia: gestão, uso e armazenamento de resíduos. **RBCIAMB**, n. 43, p. 1-16, 2017.

REN21. **Renewables Global Status Report**. Paris: REN21, 2022. 309 p. Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf). Acesso em: 02 nov. 2022.

RIBEIRO, G. B. D. **Análise técnica e econômica da produção de energia termelétrica a partir da biomassa florestal**. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SAIDUR, R. *et al.* A review on a biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, New York, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, June, 2011.

SALÁRIO. **Operador de caldeira – Salário, piso salarial, o que faz e o mercado de trabalho**. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-caldeira-cbo-862120/>. Acesso em: 15 abr. 2023a.

SALÁRIO. **Operador de co-processamento de resíduos – Salário, piso salarial, o que faz e mercado de trabalho**. Disponível em <https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-co-processamento-de-residuos-cbo-862310/>. Acesso em: 15 abr. 2023b.

SANCHES-PEREIRA, A.; TUDESCHINI, L. G.; COELHO, S. T. Evolution of the Brazilian residential carbon footprint based on direct energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 184-201, 2016.

SANQUETTA, C. R.; MILDEMBERG, C.; DIAS, M. S. M. Números atuais da certificação florestal no Brasil. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 7, n. 1, p. 1, 2022.

SANTOS, D.; SALOMÃO, R.; VERÍSSIMO, A. **Fatos da Amazônia 2021**. Amazônia 2030. 2021. 86 p. Disponível em: <file:///D:/Users/Ana%20Paula/Downloads/AMZ2030-Fatos-da-Amazonia-2021-3.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria, cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: UFV, 2013. 551 p.

SANTOS, M. E. **Avaliação do gerenciamento de resíduos sólidos em indústrias de extração e transformação de madeira localizadas na Amazônia mato-grossense**. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 159 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SANTOS, S. F. O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 2017. 144p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação de Ensino de Ciência e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SARTORI, R. S. **Avaliação econômica de uma operação de impacto reduzido em uma propriedade privada no estado amazônico de Rondônia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA. **Dória lança “REFLORESTA SP” e assina regulamentação do novo ICMS Ambiental**. 2021. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/2021/09/doria-lanca-refloresta-sp-e-assina-regulamentacao-do-novo-icms-ambiental/>. Acesso em: 20 maio 2023.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Concessão Florestal**. Disponível em: [https://snif.florestal.gov.br/pt-br/concessao-florestal\\_](https://snif.florestal.gov.br/pt-br/concessao-florestal_) Acesso em: 21 set. 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados**. Belém: SFB; Imazon, 2010. 32 p. Disponível em: <https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livretos/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira.pdf> Acesso em: 10 set. 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Laboratório de Produtos Florestais. **Banco de dados de madeiras brasileiras**. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/component/madeirasbrasileiras/especieestudada?especieestudadaid=150&Itemid>. Acesso em: 01 nov. 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Sistema Nacional de Informações Florestais. Florestas e Recursos Florestais. Brasília: SNIF, 2023. Disponível em: [https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais\\_](https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais_) Acesso em: 20 fev. 2023.

SHAW, M. D.; KARUNAKARAN, C.; TABIL, L. G. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 2, p. 198-207, 2009.

SILVA JUNIOR, F. G. Biorrefinaria é conceito aplicável ao setor florestal. **Visão Agrícola** n. 8, jan./jul. 2008.

SILVA, A. P. S.; ANATER, M. J. N.; AMARAL, D. H.; NEIVA, S. A.; COELHO, S. T. Forest residues consumption by households in large urban centers in Brazil: an Overview. *In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION*, 30., 2022, Florence. **Proceedings [...]**. Florence: ETA-Florence Renewable Energies; 2022. p. 317-321.

SILVA, J. V. H.; BITTAR, A. P.; SERRA, J. C. V.; ZUKOWISKI JÚNIOR, J. C. Diagnóstico do reaproveitamento de resíduos com potencial energético no município de Palmas-TO. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 2, p. 226-233, abr./jun. 2011.

SILVA, J. W. F.; CARNEIRO, R. A. F.; MATOS, J. M. L. Da biomassa residual ao briquete: viabilidade técnica para produção de briquetes na microrregião de Dourados-MS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 4, p. 624 – 646, 2017. <https://doi.org/10.5380/rber.v6i4.46401>.

SILVA, M. E. R.; LIMA, V. S.; NASCIMENTO, S. L.; LACERDA, B. S.; FERNANDES, V. H. F. V.; SOUSA, W. A.; CHAGAS, I. A.; DIAS, J. M. S. Caracterização física e mecânica de quatro espécies de madeira disponíveis no mercado madeireiro da região de Açailândia –MA e Imperatriz – MA. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. 1-19, 2022.

SUSIN, F. **Caracterização e secagem da madeira de 12 espécies amazônicas**. 2018. 125 f. Tese (Doutorado) –Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SUZUKI, S. Amazônia gera 26% da energia elétrica do país, mas tem 1 milhão de pessoas no escuro. **BBC News Brasil**, 3 jun. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-61654989>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SYSFLOR. **Certificações Florestais**. Curitiba: Sysflor, 2022. Disponível em: <https://www.sysflor.com.br/lista-clientes/agroflorestal-novo-horizonte-ltda/FSC>. Acesso em: 20 nov. 2022.

TORRES, P. J. P. **Avaliação técnico-econômica de diferentes tecnologias de geração de eletricidade para o aproveitamento energético de resíduos de biomassa em comunidades isoladas**. [S.l.: s. n], 2017.

TRONCOSO, K.; SILVA, A. S. LPG fuel subsidies in Latin America and the use of solid fuels to cook. **Energy Policy**, v. 107, p. 188–196, 2017.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Chapman e Hall, 1991. 494 p.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

UHLIG, A. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Sustainable Development Goals (SDGs)**. New York: UNDP, 2017. Disponível em: <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>. Acesso em: 10 jan. 2022.

URTADO A., SARTORI W.W., MORALES M.M. e TONINI H.. **Caracterização do bio-óleo como fonte energética**. IV Jornada Científica da Embrapa Agrossilvipastoril. Sinop, MT, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1044856/1/2015M.MoralesCaracteriaCaodobiooleo.pdf>. Acesso em: 15 set. 2023.

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**. Belém: Imazon; Imaflora; ICV; IDESAM, 2022.

VARKULYA JUNIOR A. **Aproveitamento dos resíduos de serraria na geração de energia elétrica no município de Ulianópolis, estado do Pará: estudo de caso para o incentivo à exploração florestal Sustentável da Amazônia**. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil**. 2000. 205 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VIDAL, A. C. F.; DA HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **Papel e Celulose**, n. 33, p. 261–314, 2011. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>. Acesso em: 01 mar. 2023.

WARAJANONT, S.; SOPONPONGPIPAT, N. Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard. **International Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 2, n. 2, p. 74-79, 2013.

WARIS, V. S.; ANTAHAL, P. C. Fuelwood scarcity, poverty and women: some perspectives. **Journal of Humanities and Social Science**, v. 19, n. 8, p. 21-33, 2014.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **WBA Global Bioenergy Statistics 2017**. Estocolmo: WBA, 2017. 80 p. Disponível em: [https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017\\_hq.pdf](https://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_hq.pdf). Acesso em: 20 dez. 2018.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **WBA Global Bioenergy Statistics 2019**. Estocolmo: WBA, 2019. 58 p. Disponível em: [http://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019\\_HQ.pdf](http://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_HQ.pdf). Acesso em: 20 nov. 2022.

WORLD WILDLIFE FUND. **Unidades de conservação no Brasil: Quanto o Brasil tem em unidades de conservação?** 2019. Disponível em: [https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/factsheet\\_uc\\_tema03\\_v2.pdf](https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/factsheet_uc_tema03_v2.pdf). Acesso em: 20 maio 2023

YAMAMOTO, S.; SIE, A.; SAUERBORN, R. Cooking fuels and the push for cleaner alternatives: a case study from Burkina Faso. **Global Health Action**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2009.

ZEN, L. R. **Métodos combinados para secagem da madeira de Eucalyptus**: Pré- secagem ao ar livre com secagem em estufa convencional. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.