

GIORDANO MARQUES CORRADI

QUALIDADE ENERGÉTICA DE DIFERENTES BIOMASSAS
FLORESTAIS UTILIZADAS NO OESTE PARANAENSE

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2021

GIORDANO MARQUES CORRADI

**QUALIDADE ENERGÉTICA DE DIFERENTES BIOMASSAS
FLORESTAIS UTILIZADAS NO OESTE PARANAENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Corradi, Giordano Marques

Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no oeste paranaense / Giordano Marques Corradi; orientador(a), Armin Feiden, 2021.

32 f.


Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2021.

1. Resíduos florestais. 2. Biomassa florestal. 3. Pinus. 4. Eucalipto. I. Feiden, Armin. II. Título.

GIORDANO MARQUES CORRADI

Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no Oeste Paranaense

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biocombustíveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



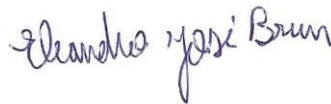
Assinatura do Orientador

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alfredo Petruski

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Eleandro José Brun

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Cascavel, 17 de março de 2021

*Aos meus pais, Gilson (in
memorian) e Rosali, por fazerem
dos meus sonhos os seus, e não
medirem forças para torná-los
reais.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela sua graça infinita.

À minha esposa Ludmila, por sempre estar ao meu lado, incentivando-me e dando-me forças para continuar nos momentos difíceis.

À minha família, por todo amor e carinho, em especial, à minha mãe Rosali, por ser minha maior incentivadora, e o meu Irmão Marlon, por ser minha referência.

Ao meu colega e amigo Mauricio, por ter paciência para ajudar-me nos estudos na sala de aula, solucionando dúvidas do meu trabalho.

A todos os amigos do mestrado, por compartilharem comigo tantos momentos, alegres ou tristes, dos quais compartilhamos ajudando uns aos outros.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Armin Feiden, por ter me auxiliado e acreditado no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Alfredo Petruski, por todo auxílio prestado.

Aos membros da Banca, o Prof. Dr. Eleandro José Brun, a Prof.^a Dr.^a Maritane Prior e a Prof.^a Dr.^a Flávia Alves Pereira, por aceitarem ao convite em participar da banca como titulares e suplentes.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA), pelo apoio para a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fatores de volume sólido para diversos produtos florestais	6
Figura 2. Principais resíduos obtidos a partir do processamento de madeira sólida nas indústrias de base florestal	7
Figura 3 – Área da Mesorregião Oeste do Paraná.....	14
Figura 4 – Distribuição da Área Florestal Plantada no Estado do Paraná, por Região da SEAB.....	15
Figura 5. Processamento e coleta da biomassa de eucalipto de árvores inteiras.....	17
Figura 6. Processamento e coleta da biomassa residual de Pinus.....	18
Figura 7. Processamento e coleta da biomassa residual de serraria de Eucalipto	20
Figura 8. Pesagem da amostra quanto ao teor de umidade.....	21
Figura 9. Amostras de densidade a granel.....	22
Figura 10. Peneira utilizada na determinação da granulometria.....	23
Figura 11. Caracterização granulométrica das biomassas	26
Figura 12. Resultado do Índice do Valor do Combustível para as biomassas avaliadas	28
Figura 13. Índice de qualidade da biomassa calculado para biomassas coletadas em fornecedores na região oeste do Paraná.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificação de tamanho e distribuição das partículas de cavaco de madeira... 10	10
Tabela 2. Valores médios do teor de umidade e densidade a granel das biomassas 25	25
Tabela 3. % do material retido nas malhas 27	27
Tabela 4. Dimensões da granulometria principal 27	27

CORRADI, Giordano Marques. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2021. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no Oeste paranaense.** Dr. Armin Feiden.

RESUMO

Diferentes de outras regiões do Estado, em que a oferta de resíduos florestais é abundante, o Oeste paranaense depende quase exclusivamente de florestas energéticas e de poucos fornecedores de resíduos de serrarias, para atender à sua demanda energética. Por ser uma região baseada no agronegócio, as áreas disponíveis para silvicultura são limitadas, exigindo que a biomassa na forma de cavaco atinja seu máximo potencial com o menor custo. Dessa forma, é preciso que ocorra um controle de qualidade especializado, impedindo a queda da conversão energética dos materiais. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo determinar o Índice de Qualidade Energética das biomassas florestais mais comercializadas na região: (i) o Cavaco de árvores inteiras de eucalipto; (ii) os Resíduos de serraria de Pinus; e (iii) os Resíduos de serraria de Eucalipto. Foram determinados os teores de umidade, de densidade a granel e de granulometria em amostras de cada material, os quais, em seguida, foram correlacionados para a determinação do Índice de Qualidade. Os resíduos de serraria apresentaram uma qualidade energética inferior ao cavaco processado de árvores inteiras de eucalipto. Isso se justifica pela alta umidade do resíduo de Pinus (47%) e a baixa densidade a granel (229 kg/m^3) do resíduo de Eucalipto. O cavaco oriundo de árvores inteiras de eucalipto tem características mais adequadas (%U=36,4%; M.E.= 361 kg/m^3), atendendo de forma mais qualificada às demandas do mercado quanto à energia térmica.

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

PALAVRAS-CHAVE: resíduos florestais, pinus, eucalipto.

CORRADI, Giordano Marques. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2021. **Energy quality of different forest biomasses used in western Paraná.**
Ph.D. Armin Feiden.

ABSTRACT

Unlike other regions of the state, where the supply of forest waste is abundant, the West of Paraná depends almost exclusively on energy forests and a few suppliers of sawmill waste, to meet its energy demand. As it is a region based on agribusiness, the areas available for forestry are limited, requiring that biomass in the form of chips reaches its maximum potential at the lowest cost. Thus, it is necessary that there is a specialized quality control, preventing the fall of the energy conversion of the materials. Therefore, this work aimed to determine the Energy Quality Index of the most commercialized forest biomasses in the region: (i) Chips from whole eucalyptus trees; (ii) Pinus sawmill waste; and (iii) Eucalyptus sawmill residues. The moisture content, bulk density and granulometry were determined in samples of each material, which were then correlated to determine the Quality Index. Sawmill residues showed a lower energy quality than the processed chips of whole eucalyptus trees. This is justified by the high humidity of the pine waste (47%) and the low bulk density (229 kg / m³) of the eucalyptus waste. The chips from whole eucalyptus trees have more suitable characteristics (% U = 36.4%; M.E. = 361kg / m³), meeting the market demands regarding thermal energy in a more qualified way.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

KEYWORDS: forest residues, pine, eucalyptus.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Apresentação	1
1.2.	Objetivo Geral	2
1.3.	Objetivos Específicos	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	Florestas Energéticas	3
2.2.	Biomassa Florestal	4
2.2.1.	Colheita e processamento	4
2.2.2.	Biomassa residual	6
2.3.	Qualidade da biomassa	8
2.4.	Propriedades da madeira	9
2.4.1.	Densidade	9
2.4.2.	Granulometria	9
2.4.3.	Teor de umidade	10
2.4.4.	Poder calorífico	11
2.4.5.	Análise Imediata	12
2.4.6.	Eficiência energética e índice de valor combustível	13
3.	MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1.	Caracterização do Local do Experimento	14
3.2.	Material	16
4.1.1	Cavaco de árvores inteiras de eucalipto	16
3.2.1.	Cavaco de resíduos de serraria de pinus	17
3.2.2.	Cavaco de resíduos de serraria de eucalipto	19
3.3.	Teor de Umidade	20
3.4.	Densidade a granel	21
3.5.	Granulometria	22
3.6.	Índice do valor do combustível	23
3.7.	Índice de qualidade energética dos cavacos	23
3.8.	Análises dos dados	24
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1.	Caracterização das biomassas	25
4.2.	Qualidade energética dos cavacos de madeira	28
5.	CONCLUSÕES	30
5.1.	Recomendações	31
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

No panorama energético atual, seja no Brasil ou no quadro internacional, torna-se cada vez mais crucial o desenvolvimento de fontes de energia renováveis e economicamente rentáveis.

Segundo Bolzani (2016), a biomassa de origem florestal para produção de energia pode ser obtida a partir de lenha (sendo geralmente uma madeira de qualidade inferior), de resíduos da colheita florestal (com volumes pouco expressivos e colheita muito artesanal) ou de cavacos, seja de plantios florestais especificamente conduzidos para esse fim ou resíduos de outros processos florestais, como das serrarias. As caldeiras à biomassa florestal modernas e de alta capacidade tendem a usar exclusivamente o cavaco como combustível.

Miranda (2016) comenta que as negociações de compra e venda de cavaco são facilitadas pelo fato de que, independentemente do tipo de processamento, as caldeiras utilizam praticamente o mesmo tipo de material, com poucas variações. Isso ocorre porque as negociações de compra dependem de questões logísticas – da localização das plantas industriais – e do preço, que varia dependendo da região produtora, mas que tende a se manter estável ao longo do ano, por conta de contratos anuais. Apesar desses fatores favoráveis para que a biomassa proveniente de cavacos seja utilizada atingindo o seu máximo potencial, é preciso que haja um controle de qualidade especializado, impedindo a queda da conversão energética do material.

Dessa forma, existe a necessidade de um controle de qualidade, visando ao máximo aproveitamento do potencial do cavaco para produzir energia. Para que a madeira tenha preservadas suas propriedades, o ideal é trabalhar com a madeira seca, picada no campo e com o transporte dos cavacos realizado o quanto antes possível, pois esses tendem a absorver umidade quando estocados a céu aberto, afetando diretamente seu poder calorífico.

Bolzani (2016) afirma também que, quanto maior a capacidade da caldeira em termos de quantidade (toneladas/hora) e pressão (bar) de vapor, maior será a necessidade de se manter estáveis as condições de operação, pois, caso contrário, perde-se em eficiência e em segurança. Quanto mais homogêneo o combustível alimentado, mais estável será a operação da caldeira.

Via de regra, o comprador deveria analisar os seguintes fatores: o teor de umidade da biomassa, a granulometria, a densidade, o poder calorífico, o teor de cinzas e a quantidade de contaminantes presentes (areia, pedras etc.). Todos esses fatores são importantes. Contudo, em função das dificuldades de execução de cada um, nem sempre o comprador os analisa em sua totalidade. Normalmente, atém-se apenas ao teor de umidade da carga, medido instantaneamente no momento do descarregamento com o auxílio de um equipamento específico (geralmente o balde M75 da Marrari), estabelecendo regras de compensação conforme o teor do produto.

A forma atual de produção, de comercialização e de consumo de biomassa florestal para fins energéticos demanda de metodologias ágeis de medição e de controle por meio de índices de qualidade energética. Dessa forma, pode ser possível atender às expectativas do fornecedor, remunerando-o adequadamente pelas características da biomassa, e às expectativas do consumidor, já que o rendimento energético das caldeiras e queimadores será otimizado pelo uso de biomassa de melhor qualidade.

1.2. Objetivo Geral

Avaliar a qualidade energeticamente de três biomassas florestais comumente utilizadas como combustível para alimentação de caldeiras nas agroindústrias do Oeste paranaense.

1.3. Objetivos Específicos

De modo a alcançar o objetivo geral proposto, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar as principais biomassas comercializadas, quanto à sua origem e forma de processamento;
- Avaliar a umidade, a granulometria e a densidade a granel de três tipos diferentes de cavacos comumente comercializados; e
- Definir um índice de qualidade energética para os cavacos de

madeira como parâmetro de comparação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Florestas Energéticas

Segundo Sartório (2014), a energia gerada por meio da biomassa é a de maior destaque entre as fontes renováveis, sendo ela a mais utilizada atualmente. A demanda por biomassa destinada à produção de energia, especialmente a biomassa florestal, tem aumentado consideravelmente com o passar dos anos. No entanto, a sua oferta não cresce no mesmo ritmo, evidenciando um *déficit* desse produto em um cenário não muito distante. Essa crescente procura tem estimulado ainda mais a busca de florestas mais produtivas, com maiores produções em menores intervalos de tempo, além de melhor qualidade. Muitas pesquisas nesse sentido vêm sendo realizadas com foco no melhoramento genético e nas práticas silviculturais, tais como a adubação, a irrigação, os tratos culturais e o espaçamento de plantio.

Em função de sua grande plasticidade ambiental, altos índices de produtividade e características energéticas (densidade da madeira e poder calorífico), o gênero *Eucalyptus* tem sido o mais utilizado para a implantação de florestas com fins energéticos (COUTO; MÜLLER, 2008). Esse gênero conta com diversas espécies, cada uma com suas propriedades e inúmeras opções de uso.

Assis (2014) comenta que, ao longo das últimas décadas, se verificaram crescentes aumentos na produtividade das florestas de eucalipto, graças ao desenvolvimento de materiais genéticos de maior potencial produtivo, sobretudo, pelos desenvolvimentos obtidos na hibridação e na clonagem, bem como à evolução das técnicas de manejo florestal. Esses aspectos têm tornado o Brasil extremamente competitivo no que diz respeito à produção de matéria-prima de baixo custo para as indústrias de base florestal. Para Vale et al. (2000), citados por Santos (2012), a utilização de determinada madeira para fins energéticos deve basear-se, entre outros, no conhecimento do seu poder calorífico e no seu potencial para produção de biomassa. Nesse contexto, os estudos que visam à seleção de espécies em florestas energéticas de eucalipto propõem homogeneizar as propriedades da madeira e melhorar, além da eficiência de queima direta, os rendimentos em carvão, o teor de carbono e outras propriedades desejadas.

A técnica de adensamento dos plantios com eucalipto, fundamentada na

necessidade da redução do ciclo da cultura e no aumento de sua produtividade, está sendo difundida devido aos resultados de pesquisas e de avaliações de campo realizadas por diversas instituições, pesquisadores e empresas (GUERRA et al., 2012). O espaçamento de plantio tem uma série de implicações do ponto de vista silvicultural, tecnológico e econômico. No manejo florestal, ele pode afetar as taxas de crescimento das plantas, qualidade da madeira, idade de corte, bem como as práticas de exploração e manejo florestal e, conseqüentemente, os custos de produção (CARON et al., 2015).

No que diz respeito ao adensamento utilizado para fins de manejo florestal, alguns trabalhos têm demonstrado a viabilidade técnica na produção de plantações adensadas, desde que sejam utilizados materiais genéticos selecionados e de maior tolerância à competição (GUERRA et al., 2016; ELOY et al., 2018; SCHWERZ et al., 2019).

2.2. Biomassa Florestal

2.2.1. Colheita e processamento

A maneira e a ordem como as operações da colheita ocorrem são definidas pelo sistema de colheita (MACHADO, 2014). Um sistema de colheita florestal é uma amálgama de operações relacionadas entre si, definidas por uma sequência, um local e um objeto de trabalho, envolvendo toda a cadeia de produção em busca de um objetivo comum (MALINOVSKI, 1981 apud MALINOVSKI, 2008).

Os sistemas de colheita são classificados de acordo com a forma que a árvore tem quando é extraída para fora do talhão, sendo esses cinco (FAO, 1977 apud RODRIGUES, 2018):

1. Sistema de toras curtas (*cut-to-length*): as árvores são cortadas e processadas no interior do talhão e extraídas na forma de toras, com até sete metros de comprimento, para as laterais das estradas ou estaleiro;
2. Sistema de fuste (*tree-length*): as árvores são cortadas, desganhadas e destopadas no interior do talhão, e o fuste, com mais de sete metros, é extraído até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para as demais etapas do processamento;
3. Sistema de árvores inteiras (*full-tree*): as árvores são cortadas no interior do talhão e extraídas inteiras (biomassa acima do solo, sem raízes) até as laterais

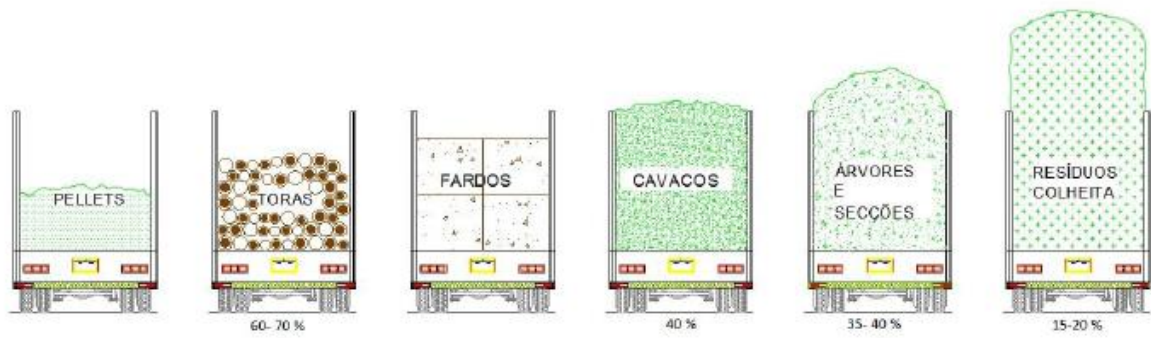
das estradas, ou ao estaleiro, para o processamento;

4. Sistema de árvores completas (*whole-tree*): as árvores são arrancadas com partes de suas raízes (toco) e extraídas até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para o processamento; e

5. Sistema de cavaqueamento (*chipping*): as árvores são cortadas no interior do talhão e extraídas inteiras (sem raízes) até as laterais das estradas, ou ao estaleiro, para serem transformadas em cavacos.

Dentre os diversos modelos de colheita, o sistema que permite a produção de cavacos no campo demonstra-se potencialmente mais econômico com grande capacidade de produção, isso porque as madeiras com menores diâmetros podem ser processadas, ao contrário dos demais (WATSON et al., 1991). Historicamente, nos Estados Unidos, o primeiro equipamento Chipper foi desenvolvido, em Seattle, pela Nicholson para a empresa Crown Zellerbach Corp®, por volta de 1961 (STENZEL, 1972). O sistema de produção de cavacos no campo é uma das inovações tecnológicas presentes no setor florestal brasileiro, permitindo o transporte da matéria-prima que será utilizada diretamente no processo produtivo, sem a necessidade de seu processamento no pátio da fábrica, como ocorre com sistema de toras, com conseqüente aumento da produtividade. Adicionalmente, apresenta-se promissor, haja vista que a possibilidade de ganho de biomassa permite estratégias diferenciadas quanto ao abastecimento das fábricas e à flexibilidade de planejamento estratégico operacional, quando comparado aos sistemas tradicionais (MARQUES, et al., 2008). A qualidade dos cavacos produzidos, que é semelhante à obtida em picadores fixos na indústria, algumas é uma das razões para que se verifique com a devida profundidade a possibilidade de utilizar esse sistema de colheita.

O principal problema encontrado na colheita de produção de cavacos no campo é o transporte, devido à utilização da capacidade de carga do veículo. A densidade do material é baixa, exigindo veículos de transporte com maior capacidade volumétrica para atingir o peso máximo legalmente permitido (Figura 1). Os fatores de influência na densidade podem ser a distribuição do tamanho dos cavacos, o método de carregamento no veículo e a vibração aplicada ou que ocorra durante o transporte (SEIXAS, 2008).

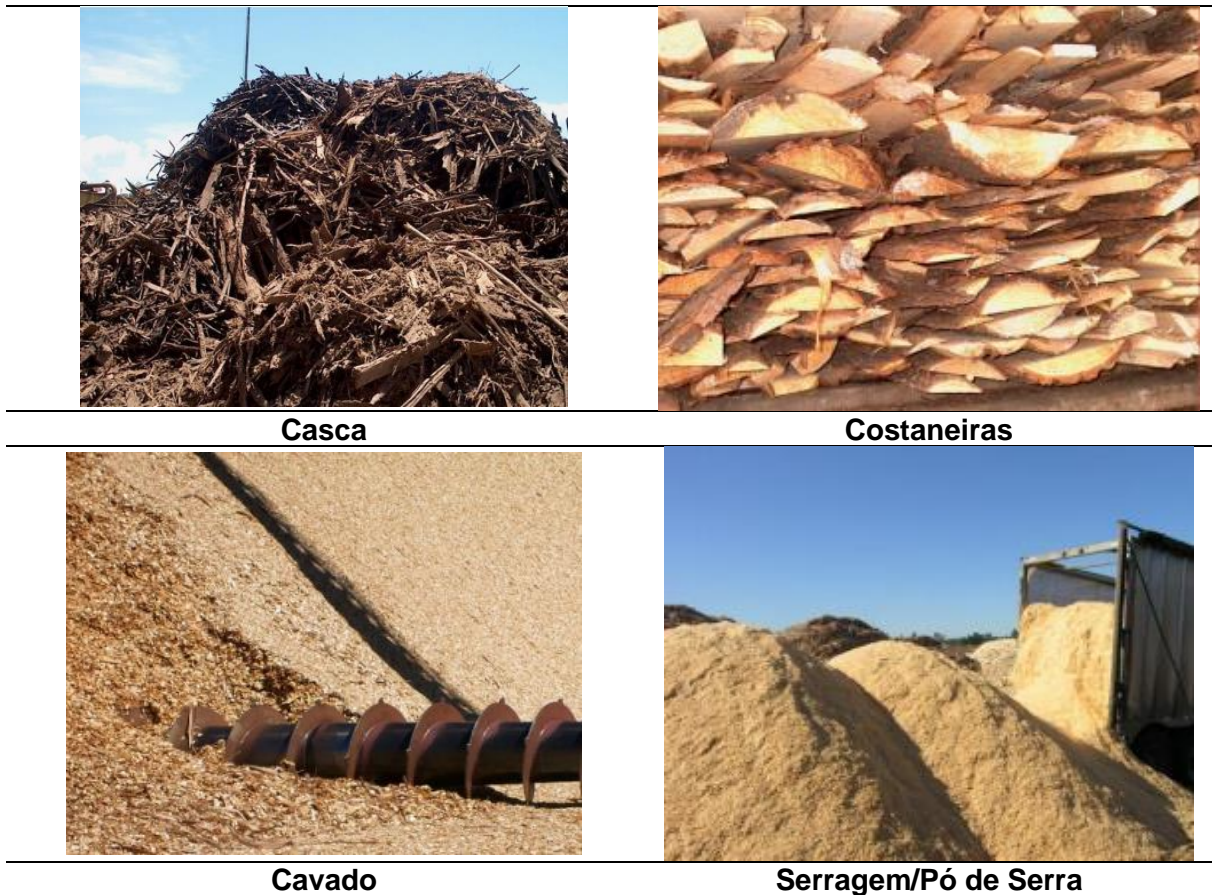


Fonte: Bjorheden, 1990; citado por Hankin & Mitchell, s.d., adaptado por Ceragioli, 2013.

Figura 1. Fatores de volume sólido para diversos produtos florestais

2.2.2. Biomassa residual

Os processos de industrialização da madeira costumam ser fontes importantes de geração de resíduos de biomassa florestal em diferentes formas, como pode ser observado na Figura 2.





Fonte: Foelkel, 2016.

Figura 2. Principais resíduos obtidos a partir do processamento de madeira sólida nas indústrias de base florestal

Existem diversas razões para que as perdas de biomassa e a geração de resíduos sejam elevadas nas fábricas do setor (Foelkel 2016):

- As toras de madeira costumam ser recebidas com casca em muitos processos industriais, sendo que o processamento implica a remoção dessa casca, que acaba sobrando como resíduo. Como a casca chega a representar 10 a 20% do volume e entre 6 a 9% do peso das toras, é fácil verificar que a contribuição da casca para gerar resíduos pode ser muito grande e muito significativa;
- As toras das árvores são materiais com uma forma que lembra a um cilindro afunilado, enquanto muitos procedimentos exigem que se extraiam peças com formatos com seções retangulares ou quadradas (serrarias, laminadoras, etc.). Isso representa a geração de enormes quantidades de refilhos e costaneiras, que são produzidas apenas para mudar o formato das peças e o design dos produtos;
- Muitas empresas ainda têm tecnologias antiquadas, com baixos níveis de automação e de sistemas inteligentes que permitam um melhor aproveitamento das toras de matéria-prima florestal;
- As toras de madeira não são uniformes em formato, em constituição, em morfologia, em sanidades, em danos mecânicos etc. Sempre existem madeiras defeituosas (nós, madeiras apodrecidas, madeira

esfacelada etc.) que precisam ser recolhidas e descartadas;

- Os processos industriais sempre geram produtos desclassificados (refugos) que não atendem às especificações desejadas pelos clientes e que acabam ampliando a geração de resíduos.

2.3. Qualidade da biomassa

O cavaco é constituído por pequenos pedaços de madeira oriundos da picagem ou destroçamento, com um comprimento variável entre 5 e 100 mm, obtidos por estilhaçamento na direção da fibra nos picadores a disco ou em corte reto nos picadores a tambor contendo ainda partículas mais longas e uma razoável porcentagem de finos. A qualidade do cavaco depende da matéria-prima e da tecnologia utilizada na sua produção. Para o cavaco entrar em um sistema e ser utilizado como combustível, deve-se manter um teor de umidade inferior a 30% a fim de manter a eficiência da produção (BILLO, 2019).

Outro fator importante é a especificação do tamanho da partícula. A degradação do cavaco de madeira (perda de matéria seca) deve ser minimizada para os plantios energéticos para que se mantenha economicamente viável (GARSTANG et al., 2002). Na utilização de madeira como combustível, é imprescindível a sua caracterização, que tem sido realizada pela determinação das propriedades físicas (granulometria, massa específica, densidade de carga e teor de umidade), pela análise imediata, análise elementar, análise somativa e poder calorífico (MOERS et al., 2011). O conhecimento sobre a composição e as propriedades da biomassa é importante na busca pela melhor utilização desse material do ponto de vista energético e ambiental (CHIANG et al., 2012).

Segundo Valverde et al. (2012), o insumo florestal, conhecido como cavaco, já é competitivo aos seus concorrentes derivados do petróleo. De acordo com os mesmos autores, o cavaco pode contribuir para uma redução de aproximadamente 50% dos custos de produção de vapor e energia, quando comparado ao petróleo, mas tem encontrado dificuldade de se expandir no mercado. Isso acontece em virtude da falta de uma política governamental que estimule a substituição tecnológica dos equipamentos (caldeiras) nas indústrias e da facilidade no manuseio desses combustíveis fósseis (petróleo).

2.4. Propriedades da madeira

2.4.1. Densidade

Veiga (2014) comenta que a densidade é uma propriedade importante por ser útil na definição da utilização da madeira. A importância da determinação da densidade se estende para o transporte da madeira em indústrias, principalmente, as moveleiras e de papel e celulose.

Em função de sua importância e da facilidade de determinação, frente aos outros parâmetros de qualidade, a densidade básica é a característica da madeira mais estudada e difundida industrialmente, além de também influenciar no manejo das florestas de eucalipto. Essa característica é de grande importância na definição da idade de corte, devido ao seu incremento observado ao longo dos anos (RIBEIRO; FILHO, 1993).

A madeira mais densa apresenta maior quantidade de substância em um mesmo volume, portanto, a porosidade e a capilaridade para entrada de líquidos também serão menores. Ademais, as madeiras mais densas geralmente produzem cavacos mais espessos (FOELKEL, 2009). A madeira de densidade alta é mais dura e mais difícil para picar, o que requer ajustes na operação, mais manutenção do picador e mais energia, fazendo com que sejam produzidos cavacos com dimensões mais variadas (PARHAM, 1983). Uma madeira mais homogênea, no que diz respeito à sua densidade no interior do tronco, poderá se comportar melhor no processamento em madeira serrada, em relação à sua estabilidade dimensional e possíveis rachaduras, refletindo-se em maior uniformidade nas demais propriedades tecnológicas. As peças de madeira com menor variação de densidade são adequadas para as utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas (OLIVEIRA, et al, 2005).

2.4.2. Granulometria

Segundo Kollman et al. (1975), a dimensão das partículas é uma variável de merecida importância para determinar seu tipo e tamanho. A correta classificação granulométrica dos cavacos permite prever a energia liberada na combustão, assim

como assegurar o fluxo de cavacos pelo sistema de alimentação. Cavacos muito grandes impedem o fluxo de material pelo sistema, causando entupimento.

Partículas muito finas, por sua vez, queimam rapidamente na câmara de combustão, conduzindo à variação do calor e à formação de cinzas (GRUNKRAUT, 2012). A maior superfície específica e a maior reatividade da madeira picada em cavacos, em comparação às toras de lenha, podem aumentar a eficiência de diferentes sistemas de utilização de biomassa (NOGUEIRA, 2000).

A granulometria ideal é definida em função das necessidades energéticas do sistema e das características da caldeira, levando-se em consideração a velocidade ideal de reação. Apesar da diversidade de tamanhos do material favorecer uma melhor acomodação de carga (CERAGIOLI, 2013), a homogeneidade é mais interessante no ponto de vista energético devido a algumas dificuldades que a heterogeneidade acarreta.

Existem diferentes classes granulométricas para os cavacos, conforme apresentado na Tabela 1. Visando à produção de cavacos homogêneos e de qualidade, a granulometria principal deve representar uma fração maior que 80% do peso total, a fração de finos não deve ser maior do que 5% e a de *over* (partículas maiores) não deve ser maior do que 1% (LIPPEL, 2014).

Tabela 1. Especificação de tamanho e distribuição das partículas de cavaco de madeira

Classe de Tamanho	Fração Principal (>80% do peso)	Fração de Finos (<5% do peso)	Fração Over (Máx 1%>X)
P16	3,15mm<T<16mm	<1mm	X=25mm
P25	3,15mm<T<25mm	<1mm	X=45mm
P45	3,15mm<T<45mm	<1mm	X=63mm
P63	3,15mm<T<63mm	<1mm	X=100mm
P100	3,15mm<T<100mm	<1mm	X=200mm

Fonte: Lippel, 2014.

Nogueira (2019) explica que as definições das classes granulométricas supracitadas são o mais próximo que existe a respeito de qualidade de cavacos de madeira para energia no Brasil. Entretanto, existem normas estrangeiras, como a europeia e a canadense, que situam as especificações para os biocombustíveis sólidos, incluindo os cavacos de madeira.

2.4.3. Teor de umidade

A utilização racional da madeira como matéria-prima implica padronização de suas características, garantindo eficiência de conversão. O teor de umidade se destaca entre as principais características da madeira, pois o seu acompanhamento durante o processo de secagem é de grande necessidade para sua trabalhabilidade e utilização.

De acordo com o Comunicado Técnico da EMBRAPA (2008), no momento do corte da árvore, se a umidade está acima de 60%, porém, por sua natureza higroscópica, decorrente de sua composição química – polímeros de celulose, hemicelulose e lignina (BORGES; QUIRINO, 2004) –, a madeira é capaz de absorver ou liberar água para o meio ambiente. Existem dois tipos de água na madeira que devem ser considerados por ocasião da secagem para fins energéticos:

1) Água de capilaridade (água livre) localizada nos vasos, nos meatos, nos canais e no lúmen das células, podendo ser facilmente retirada. Quando toda a água de capilaridade é retirada da madeira, remanescendo apenas a água de adesão (por exemplo: na secagem da madeira no campo), diz-se que a madeira atinge o seu ponto de saturação das fibras (PSF). Normalmente, o PSF varia de 22 % e 30 % de umidade, dependendo da espécie;

2) Água de adesão ou higroscópica (água presa), que é ligada às fibras da madeira. A retirada da água higroscópica é mais difícil e mais lenta, sendo necessária a utilização de energia no processo de secagem.

O teor de umidade é um dos parâmetros de maior influência na eficiência de combustão da madeira nas caldeiras de biomassa. A presença de água na madeira representa a redução do poder calorífico líquido em razão da energia necessária para evaporá-la nas fornalhas das caldeiras de biomassa. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil e conseqüentemente variar o processo de cogeração ou produção de energia elétrica em função da variação na produção de vapor (BARCELLOS et al.,2005).

2.4.4. Poder calorífico

O poder calorífico da madeira é dependente do teor de umidade, da composição química (lignina, cinzas e extrativos, por exemplo), do tempo de estocagem (perda de extrativos), da época da estocagem e da espécie da madeira utilizada.

A qualidade da biomassa para fins energéticos está diretamente relacionada à quantidade de energia gerada na sua completa combustão. O poder calorífico pode ser expresso em: poder calorífico útil (PCU), poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCU é a energia “aproveitável” da biomassa quando essa é utilizada energeticamente nas indústrias, ou seja, é o poder calorífico da madeira desconsiderando a energia necessária para evaporar a água (umidade) presente nesta biomassa (VARANDA et al., 2009). O poder calorífico usualmente é obtido pela queima de uma quantidade conhecida de combustível, medindo-se o calor libertado. No caso da madeira, podem-se encontrar valores desde 3.000 kcal/Kg até 5.400 Kcal/ Kg (BRITO e BARRICHELO, 1979). Doat (1977) cita que o poder calorífico é dito superior (PCS) quando a combustão se efetua a volume constante, e quando a água formada durante a combustão é condensada. Por outro lado, o poder calorífico dito inferior (PCI) é aquele cuja combustão é efetuada em uma pressão constante, quer dizer, ao ar livre; nesse caso, a água de combustão não é condensada.

2.4.5. Análise Imediata

A análise química imediata fornece a percentagem de umidade, de material volátil, de carbono fixo e de cinzas. Assim, ela representa a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como dá uma indicação do material residual (cinzas) (KOBYLARZ, 2016).

Segundo Arola (1976), em torno de 75% da madeira é queimada como material volátil e 25% como carbono fixo. Essa proporção entre os materiais influencia as características de queima no combustível madeira, pois os componentes voláteis são rapidamente queimados na forma gasosa, quando liberados. Já o carbono fixo é queimado de forma lenta na fase sólida do carvão.

O teor de cinzas corresponde a substâncias que não entram em combustão, ficando na forma sólida, e são indesejáveis para uso energético. Ou seja, são substâncias compostas de material inorgânico e têm relação inversa com o poder calorífico (CHAVES et al., 2013).

As cinzas são constituídas de composto de silício (Si), de potássio (K), de sódio (Na), de enxofre (S), de cálcio (Ca), de fósforo (P), de magnésio (Mg) e de ferro (Fe). Quando presentes em alta concentração, podem diminuir o poder

calorífico, causando perda de energia; além disso, sua presença afeta a transferência de calor (KLAUTAU, 2008). Segundo Vieira et al. (2013), um alto teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas e pela perda de calor com a saída das cinzas do reator, que não pode ser plenamente recuperado. Relatam ainda que, para a gaseificação, o menor teor de cinzas reduz o entupimento e incrustações por escórias no equipamento.

2.4.6. Eficiência energética e índice de valor combustível

A eficiência é definida no Dicionário Aurélio como sendo a “capacidade de realizar tarefas ou trabalhos de modo eficaz e com o mínimo de desperdício”. Pode-se dizer, portanto, que a eficiência energética de um combustível é a capacidade que esse tem de fornecer energia a um sistema de modo eficaz e com o mínimo de desperdício. O PCU é muito utilizado no âmbito comercial brasileiro para representar a eficiência energética do combustível. Entretanto, outros fatores devem ser analisados conjuntamente, como a densidade básica, o teor de cinzas e a umidade.

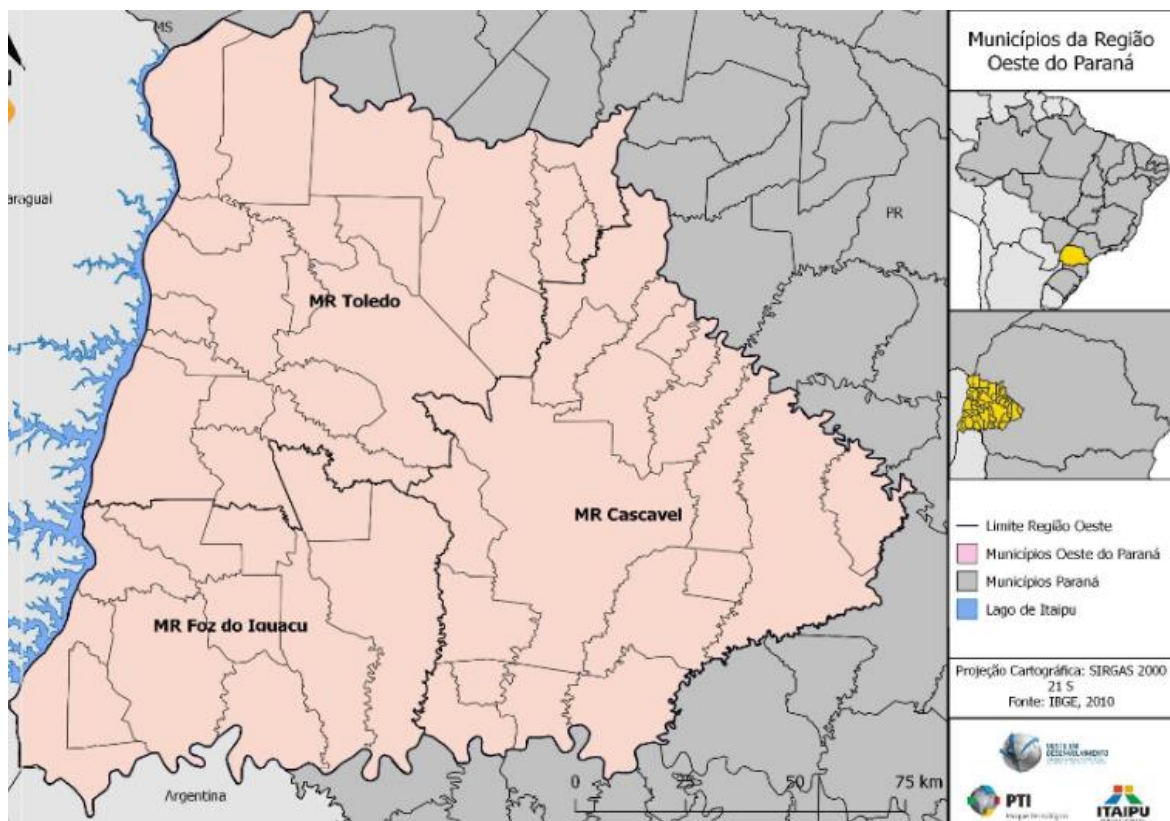
A fim de elaborar um parâmetro de comparação entre biomassas de diferentes espécies florestais quanto à sua qualidade como combustível, Purohit e Nautiyal (1987) criaram o Índice de Valor Combustível (IVC), que leva em consideração todas essas características desejáveis.

A granulometria também afeta indiretamente na eficiência energética, já que a superfície de contato do material influencia na reatividade e na velocidade de reação. Desse modo, a madeira picada em cavacos tem maior eficiência energética em comparação às toras de lenha, por conta de uma maior superfície de contato (NOGUEIRA et al., 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do Local do Experimento

A mesorregião Oeste paranaense contempla 50 municípios, agrupados em três microrregiões, como pode ser observado na Figura 3. Configura-se como uma mesorregião devido aos municípios de Cascavel, Foz do Iguaçu e Toledo serem considerados núcleos urbanos de grande importância e que norteiam a economia de suas microrregiões.



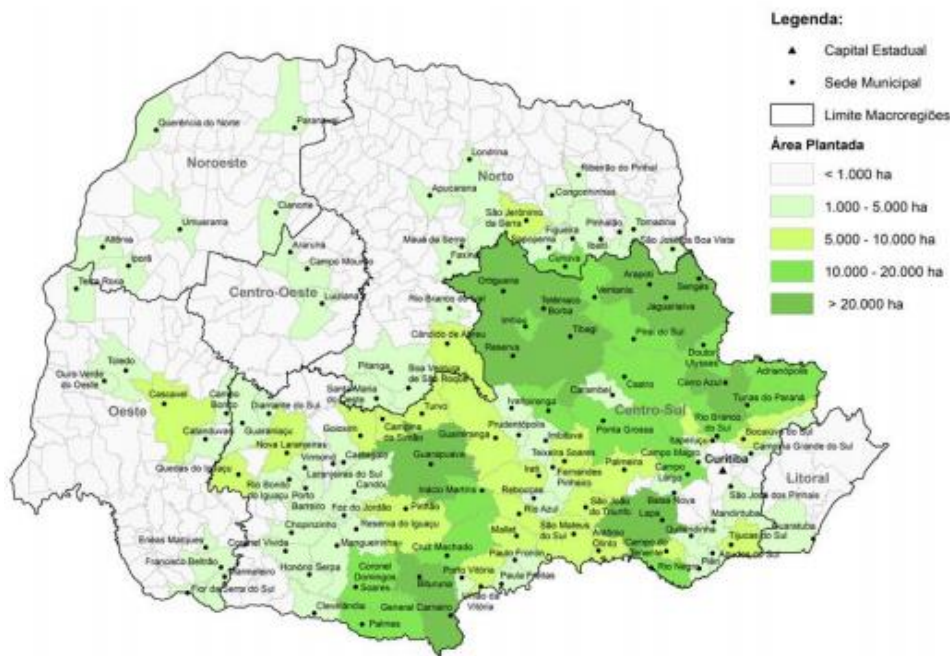
Fonte: PTI/Itaipu. Adaptado pelo autor.

Figura 3 – Área da Mesorregião Oeste do Paraná

De acordo com o levantamento do IBGE (2019), a região Oeste do Paraná tem uma população de 1.219.558 habitantes, ocupando uma área de 2.811.242 km², o que representa 12% da área total do estado. A mesorregião de Toledo e as áreas baixas lindeiras ao rio Paraná, próximas a Foz do Iguaçu, têm clima tropical, subquente, superúmido com subseca. A mesorregião de Cascavel e demais áreas de Foz do Iguaçu se diferem por pelo clima temperado brando, superúmido sem estação de seca.

A região é caracterizada pela sua importância no setor do agronegócio. De acordo com dados do IBGE (2019), o Oeste do Paraná é responsável pela produção de 20% de toda a soja produzida no estado, 35% do milho e 13% do trigo. Conseqüentemente, tem números expressivos na produção de proteína animal, sendo a região com o maior rebanho de suínos no Paraná, com 65%, 32% da produção de aves e 78% da produção de peixe (tilápia).

Com relação ao setor florestal, o estado do Paraná conta com aproximadamente 967.000 hectares plantados de florestas comerciais, sendo 70% de pinus e 30% eucalipto, segundo dados da IBÁ (2016), citado pela APRE (2020). Não obstante, os maciços florestais estão concentrados na região Centro-Sul do estado, onde existem grandes empresas produtoras e consumidoras de madeira, como pode ser observado na Figura 4, a seguir.



Fonte: APRE, 2020.

Figura 4 – Distribuição da Área Florestal Plantada no Estado do Paraná, por Região da SEAB

A região Oeste paranaense não tem grandes áreas plantadas de florestas, porém, existe a necessidade de plantios comerciais energéticos, prioritariamente eucalipto, para atendimento da demanda do setor do agronegócio. Esse cenário se torna um desafio para o setor na região, impondo a necessidade de se produzir e consumir matéria-prima florestal de maneira eficiente.

3.2. Material

De acordo com o relato dos setores de compras das principais empresas consumidoras de biomassa florestal para energia na região, as biomassas mais comumente comercializadas se diferem na origem da matéria-prima e na forma de processamento, sendo elas:

- 1) CV Eucalipto: Biomassa na forma de cavaco, proveniente de árvores inteiras de eucalipto;
- 2) RS Pinus: Biomassa na forma de cavaco, proveniente de resíduos de serraria de pinus;
- 3) RS Eucalipto: Biomassa na forma de cavaco, proveniente de resíduos de serraria de eucalipto.

4.1.1 Cavaco de árvores inteiras de eucalipto

Apesar de não ter pesquisas ou dados oficiais, relatos de empresas florestais e viveiros da região indicam que o perfil das florestas de eucalipto é, na grande maioria, de *Eucalyptus grandis* ou *Eucalyptus urograndis*, de 6 a 15 anos de idade.

Dessa forma, a coleta do material foi proveniente de uma floresta de *Eucalyptus grandis* com aproximadamente 10 anos de idade localizada no município de Cascavel (PR), representando o perfil florestal da região.

O fornecimento do material foi realizado pela empresa MCW Bioenergia. De acordo com o responsável técnico, as árvores foram derrubadas e passaram pelo processo de secagem ao ar livre por aproximadamente 90 dias, período necessário para diminuir o teor de umidade para níveis inferiores a 40% exigidos pelo mercado. Em seguida, foram arrastadas até a margem do talhão, onde foram processadas em cavaco.

A biomassa foi coletada no momento do processamento e carregamento do caminhão para a indústria, de acordo com a Figura 5. Foram coletadas três amostras, totalizando aproximadamente 15 kg, em diferentes momentos do

carregamento (início, meio e fim).



Fonte: Autor, 2021.

Figura 5. Processamento e coleta da biomassa de eucalipto de árvores inteiras

3.2.1. Cavaco de resíduos de serraria de pinus

Apesar de existirem poucas áreas de pinus na região, algumas serrarias ainda produzem madeira serrada de pinus para atendimento da demanda, principalmente do setor da construção civil regional. Dessa forma, o resíduo gerado dessa industrialização acaba sendo comercializado como biomassa energética.

A matéria-prima é oriunda de principalmente *Pinus Taeda* com diversas idades, podendo variar de 7 a 25 anos, o que contribui negativamente para a homogeneidade do material residual gerado. As serrarias, na sua maioria, têm baixa tecnologia e baixa produtividade.

O material foi coletado na serraria Assolini, localizada em Cascavel (PR). A serraria consome toras de 15 a 35 cm de diâmetro, e produz madeira serrada para a construção civil. Toda a matéria-prima é adquirida de florestas de desbaste ou corte raso na região Oeste do Paraná. A biomassa é produzida a partir de sobras de madeira serrada de pinus. As toras são desdobradas e, nesse processo, 50% do volume inicial são sobras constituídas principalmente de cascas, costaneira, serragem e pó de serra.

As costaneiras são picadas, transformadas em cavaco de madeira de pinus comercializada como biomassa energética para as agroindústrias. Desse material, foram coletados aproximadamente 15 kg, armazenados em saco de ráfia, como pode ser observado na Figura 6.



Processamento da biomassa



Armazenamento



Material coletado

Fonte: Autor, 2021.

Figura 6. Processamento e coleta da biomassa residual de Pinus

3.2.2. Cavaco de resíduos de serraria de eucalipto

As serrarias que processam toras de eucalipto da região Oeste do Paraná fornecem principalmente madeira serrada para fabricação de paletes industriais utilizados nas agroindústrias. A matéria-prima utilizada são toras de 15 cm a 30 cm de diâmetro de diversas idades, proveniente das mesmas florestas utilizadas para a produção de cavacos processados no campo. Geralmente, os mesmos fornecedores de biomassa processada no campo também fornecem as toras para serraria.

Da mesma forma que as serrarias de pinus, não há investimento em tecnologias nem grandes produções de madeira serrada. Os resíduos também são comercializados como biomassa energética nas agroindústrias.

A coleta foi realizada na serraria Longo Madeiras, em São Pedro do Iguaçu (PR). Foram coletados materiais residuais do desdobro de toras de eucalipto, principalmente de costaneira picada. Foi coletado um saco de rafia de aproximadamente 15 kg diretamente da pilha acumulada após o picador, pronta para o carregamento do caminhão, como mostra a Figura 7.



Processamento da madeira em tora



Armazenamento dos resíduos industriais



Material Coletado

Fonte: Autor, 2021.

Figura 7. Processamento e coleta da biomassa residual de serraria de Eucalipto

3.3. Teor de Umidade

O teor de umidade foi avaliado de acordo com os parâmetros descritos na NBR 14.929 (ABNT, 2003) - *Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa*. Primeiramente, foram fracionadas cinco amostras de aproximadamente 300 g de cada tipo de biomassa coletada. Obteve-se o peso úmido de cada amostra por meio de uma balança analítica de precisão. As amostras foram introduzidas em estufa a $100 \pm 10^\circ\text{C}$ até que a massa ficasse constante, obtendo-se a massa seca. O teor de umidade foi obtido pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem, como pode ser observado na Figura 8.

O método em questão é conhecido como gravimétrico ou por pesagens, em que se utiliza a equação (1).

Equação 1

$$U = \frac{(Mu - Ms)}{Mu} \times 100$$

Em que:

U = Umidade na madeira (%)

Mu = Massa úmida da amostra (g)

Ms = Massa seca da amostra (g)



Fonte: Autor, 2021.

Figura 8. Pesagem da amostra quanto ao teor de umidade

3.4. Densidade a granel

A densidade a granel foi obtida conforme a norma da ABNT NBR 6922 (1981). O material foi armazenado em um recipiente de dimensões de 3,2 litros ou 0,0032m³ até completar seu volume. Em seguida, o conjunto foi pesado, sendo descontado o peso do recipiente, como pode ser visto na Figura 9.

A umidade do material não foi padronizada conforme a norma, já que o intuito era estudar o efeito da umidade da biomassa no momento da comercialização.

O cálculo da densidade a granel foi obtido de acordo com a seguinte equação:

Equação 2

$$DG = \frac{Pu}{Vu}$$

Em que:

DG = densidade a granel (g/cm³);

Pu = massa da amostra a umidade u% (g);

Vu = volume úmido (cm³).



Armazenamento a granel do material

Pesagem do material armazenado

Fonte: Autor, 2021.

Figura 9. Amostras de densidade a granel

3.5. Granulometria

Aproximadamente 10 kg de cada amostra foram submetidos ao teste de separação granulométrica em um separador de partículas com seis peneiras de malhas (75 mm, 50 mm, 35 mm, 25 mm, 15 mm e 5 mm) mais o fundo). O equipamento ficou ligado por aproximadamente 10 minutos, garantindo a movimentação total do material entre as malhas, como indica a Figura 10. Em seguida, foi calculado o percentual de material retido em cada uma das peneiras em relação ao volume total inicial. Por fim, foi realizada a classificação granulométrica de acordo com Lippel (2014).



Fonte: Autor, 2021.

Figura 10. Peneira utilizada na determinação da granulometria

3.6. Índice do valor do combustível

Purohit & Nautiyal (1987) desenvolveram o Índice de Valor Combustível (IVC), levando em conta as características mais desejadas para um combustível ideal: alto poder calorífico, alta densidade da madeira, baixo teor de cinzas e baixo teor de umidade. Nessa metodologia, quanto maior o valor do índice, melhor o valor do combustível avaliado. Assim, o índice de valor combustível (IVC) foi exposto da seguinte forma na Equação 3:

Equação 3

$$IVC = \frac{(PCS \times DB)}{(TC \times U)}$$

Em que:

PCS: Poder calorífico superior (kcal/g);

DB: Densidade básica (g/cm³);

TC: Teor de cinzas (%);

U: Umidade (%).

3.7. Índice de qualidade energética dos cavacos

Nogueira (2019), com intuito de estabelecer um parâmetro de comparação entre as diferentes biomassas avaliadas na pesquisa, propôs um índice de qualidade energética de cavacos (Q) em que, por meio de uma somatória, correlaciona as principais características analisadas e consideradas na determinação da qualidade dos cavacos, ponderando a importância para cada uma. No trabalho realizado, utilizou-se como inspiração a lógica *Fuzzy*, que, segundo Rignel (2011), pode ser entendida como uma situação em que não é possível responder simplesmente "sim" ou "não". Mesmo conhecendo as informações necessárias sobre a situação, dizer algo entre "sim" e "não", como "talvez" ou "quase", torna-se mais apropriado. Para atender aos requisitos da lógica *Fuzzy*, antes de se aplicar os parâmetros na equação, os valores de cada conjunto de parâmetro foram divididos pelo maior valor de seu conjunto, obtendo-se, assim, números de 0 a 1 adimensionais, em que, quanto mais próximo de 1, mais qualificada é a biomassa analisada.

Estabeleceu-se que 50% do índice seria representado pelo valor energético do material, constituindo pelo índice de valor combustível (IVC) por ser mais completo quanto às propriedades correlacionadas em sua equação (equação 3), e 50% pelas propriedades da forma física, sendo 30% devido à homogeneidade da granulometria do material (percentual de cavacos retidos na fração granulométrica principal) e 20% à densidade a granel, por sua importância no transporte. A expressão matemática do índice é apresentada na Equação 4.

Equação 4

$$Q = [(0,5 \times IVC) + (0,3 \times FP) + (0,2 \times DG)]$$

Em que:

Q: Índice de qualidade energética da biomassa;

IVC: Índice de valor combustível (kcal/m³);

FP: Percentual da fração granulométrica principal;

DG: Densidade a granel;

3.8. Análises dos dados

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, verificada a diferença, foram submetidos à comparação múltipla de médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das biomassas

Na Tabela 2, a seguir, são apresentados os valores médios do teor de umidade (%U) e de densidade a granel (D.G.) das biomassas avaliadas. O teor de umidade obteve valores semelhantes para as biomassas provenientes do eucalipto, mantendo-se abaixo dos 40% de umidade, limite máximo exigido pelo mercado. A umidade elevada da biomassa de pinus em relação às biomassas de eucalipto é justificada pela necessidade de serrar a madeira do pinus logo após a sua colheita. A demora nesse processo pode resultar no aparecimento de fungos manchadores na tora, diminuindo consideravelmente a qualidade e o valor de mercado da madeira serrada. O tempo de secagem das árvores em campo é o fator que mais interfere no teor de umidade da biomassa, podendo sofrer ainda interações de fatores ambientais locais, como a umidade relativa do ar, a temperatura, a época do ano entre outros.

Tabela 2. Valores médios do teor de umidade e densidade a granel das biomassas

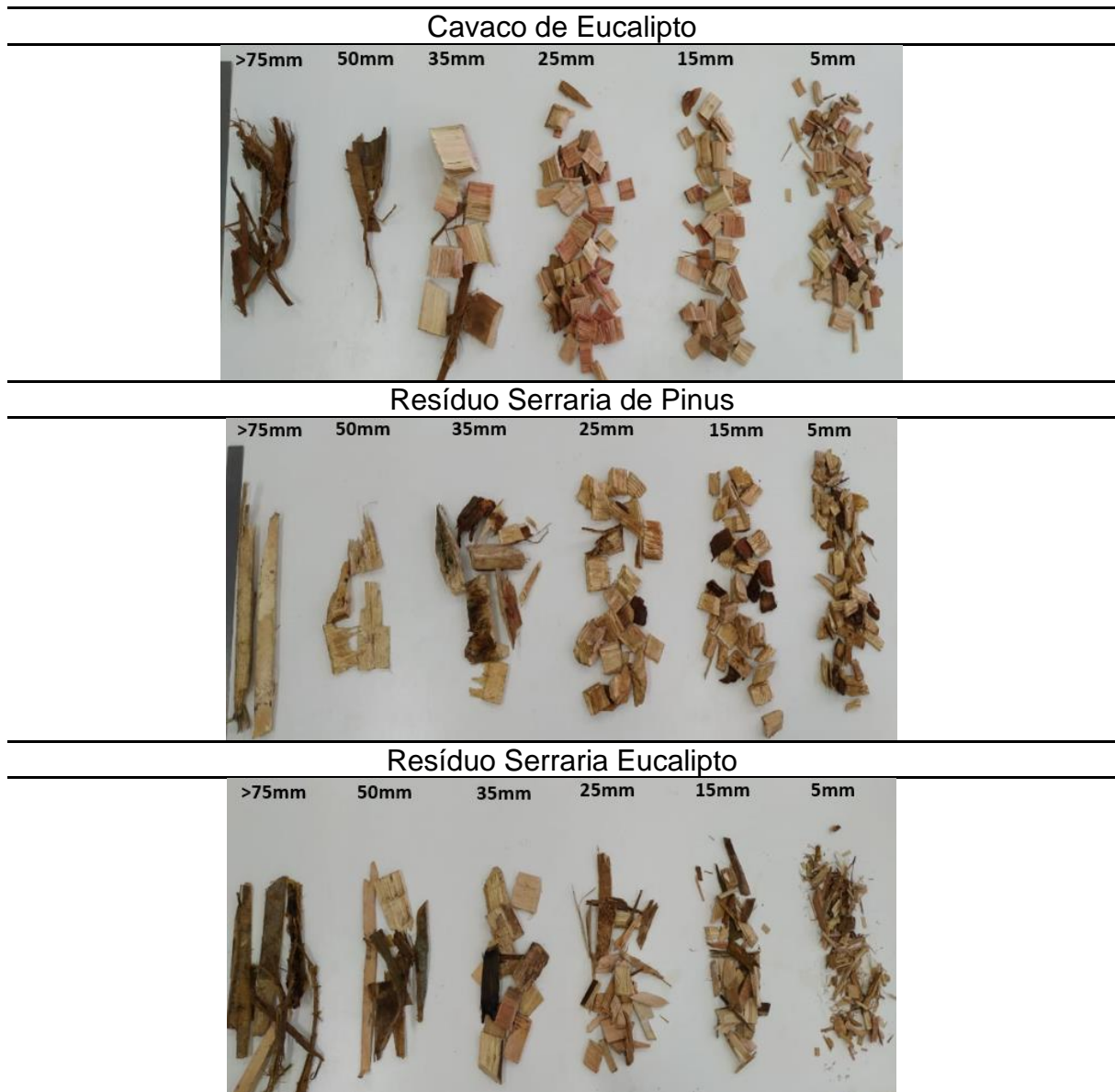
Biomassa	%U	CV	D.G (kg/m³)	CV
CV Eucalipto	36,05 a	1,6%	361,9 a	0,4%
RS Pinus	46,82 b	2,9%	321,8 b	0,5%
RS Eucalipto	35,45 a	1,7%	229,0 c	0,3%

Fonte: Autor, 2021.

Em que: %U – Teor de umidade, D.G – Densidade a Granel e CV – Coeficiente de variação. Para uma mesma propriedade, médias seguidas de uma mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

Com relação aos valores da densidade a granel, todas as biomassas apresentaram valores médios diferentes entre si. Vale destacar os valores relativos às amostras de RS Eucalipto, muito inferiores às amostras de CV Eucalipto e RS Pinus. Isso se deve principalmente pela grande proporção de costaneiras em relação à madeira de cerne e pelo tempo de armazenamento das toras no pátio da serraria, diminuindo o teor de umidade do material. Em estudo realizado por Nogueira (2019), os valores de densidade a granel de cavaco de eucalipto processado em campo variaram de 294 kg/m³ até 376 kg/m³, dependendo o tempo de secagem em campo, o que está diretamente relacionado à umidade que influencia no peso do material, uma vez que, quanto mais água estiver presente, mais pesado estará e, conseqüentemente, maior será a massa específica.

Sobre a granulometria dos materiais, os tipos de partículas retidas em cada uma das peneiras do separador estão apresentados na Figura 11. Nas peneiras de malhas superiores (75 e 50 mm), 100% dos materiais são de cascas ou lascas de madeira, materiais não retidos nas peneiras dos picadores. Esse problema pode ser resolvido ajustando-se os picadores, trocando as facas e contra-facas nos períodos corretos e adequando a malha das peneiras. Esses materiais de grandes proporções podem afetar a operação de abastecimento das caldeiras, travando correias e elevadores.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 11. Caracterização granulométrica das biomassas

Quanto à forma dos cavacos, na peneira de malha de 25 mm, foram retidos materiais mais homogêneos; já na malha de 5 mm, foram retirados os mais

heterogêneos. A biomassa proveniente de árvores inteiras de eucalipto (CV Eucalipto) apresentou cavacos com aspectos mais homogêneos comparativamente entre todas as malhas das outras amostras. Isso pode ser explicado por ser um processo dedicado e exclusivo à produção de biomassa. Diferentemente dos resíduos de serrarias, em que os equipamentos não devem sofrer manutenções preventivas de rotina, pois se trata de um subproduto dessas empresas, não sendo o foco principal.

Baseado no estudo realizado por Lippel (2014), que estabelece que a fração de finos é representada por partículas inferiores a 3,15 mm não devendo ultrapassar 5%, no presente trabalho foi adotado um tamanho inferior a 5 mm. Mesmo aumentando a margem dessa fração, nenhuma das amostras ultrapassou o limite de 5%.

A Tabela 3 apresenta os valores médios dos percentuais de material retido em cada peneira para cada tratamento estudado.

Tabela 3. % do material retido nas malhas

Biomassa	Percentual de cavacos retidos na malha						
	>75mm	50mm	35mm	25mm	15mm	5mm	<5mm
CV Eucalipto	0,31%	0,25%	3,58%	31,66%	26,90%	33,57%	3,73%
RS Pinus	0,77%	0,50%	1,99%	30,16%	34,82%	26,99%	4,76%
RS Eucalipto	2,33%	2,08%	8,80%	28,94%	33,25%	20,91%	3,69%

Fonte: Autor, 2021.

Ainda com base em Lippel (2014), determinou-se que a granulometria principal é a somatória acumulativa dos percentuais superiores a fração de finos (5 mm) até um tamanho “X” cuja soma resulte em um valor igual ou superior a 80%.

Tabela 4. Dimensões da granulometria principal

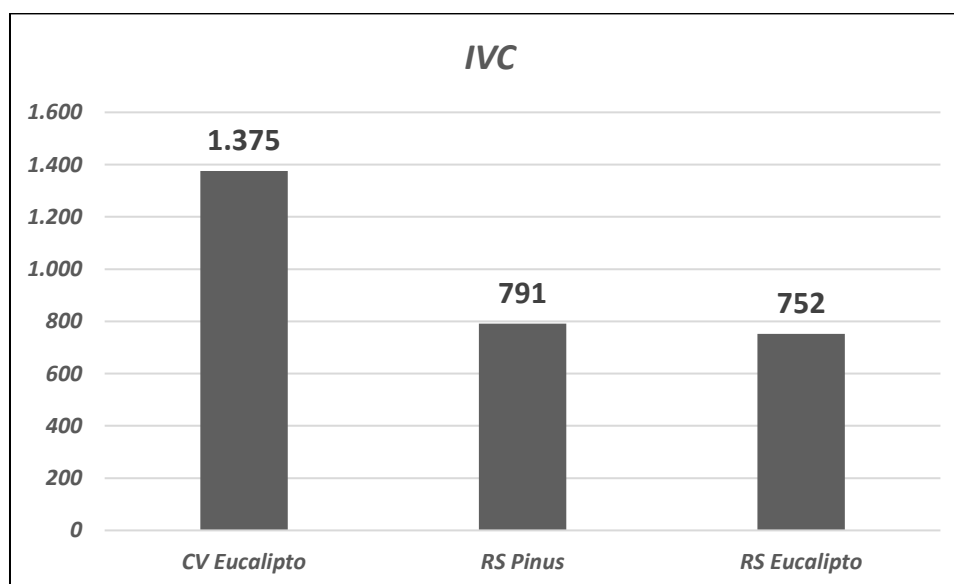
Biomassa	Granulometria Principal	%
CV Eucalipto	25mm	92,13
RS Pinus	25mm	93,56
RS Eucalipto	25mm	84,33

Fonte: Autor, 2021.

Em todas as biomassas avaliadas, a granulometria principal foi de 25 mm, porém, com proporções diferentes. Os cavacos de eucalipto produzidos em campo (CV Eucalipto) e resíduos de serraria de pinus (RS Pinus) obtiveram proporções

semelhantes, superior ao limite mínimo estabelecido por Lippel (2014). Já O RS Eucalipto apresentou uma proporção muito próxima do limite de 80%.

Buscando apresentar uma proposta de obtenção dos valores de IVC mais ágil, foi substituído na Equação 3 o valor de Densidade Básica pelo valor da Densidade a Granel. Ainda na mesma equação, para os valores de PCS e TC, foram utilizados valores referenciais de estudos semelhantes para cada tipo de biomassa avaliada. A seguir, na Figura 12, são apresentados os resultados do IVC para as biomassas avaliadas na região.



Fonte: Autor, 2021.

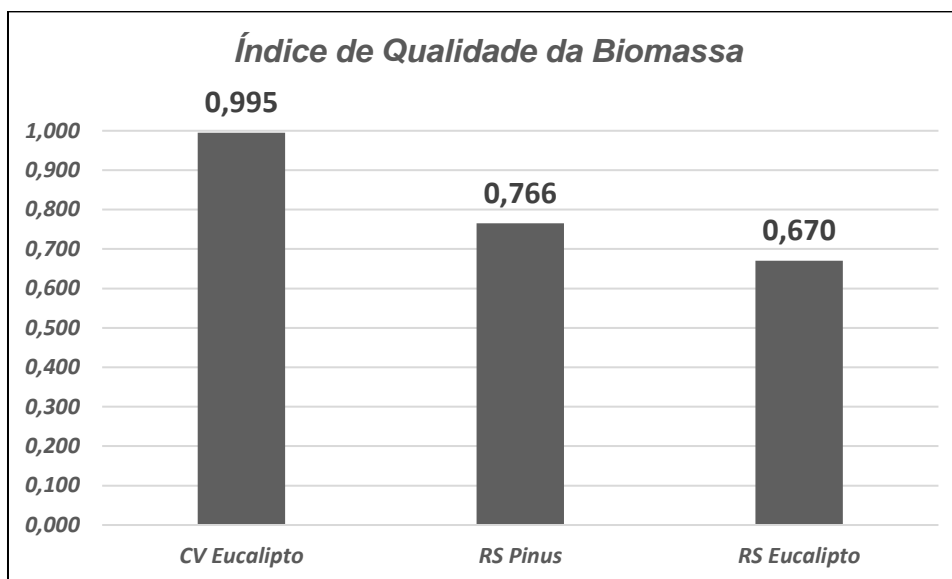
Figura 12. Resultado do Índice do Valor do Combustível para as biomassas avaliadas

*Para os valores de Poder Calorífico Superior, foi tomado como referência o estudo realizado por Lopes (2012), em que: CV Eucalipto e RS Eucalipto – PCS: 4.658Kcal/kg; e RS Pinus – PCS: 4.720Kcal/kg. Para os valores do Teor de Cinzas, foi tomado como referência o estudo realizado por Brand (2014), no qual: CV Eucalipto – 0,34%; RS Eucalipto – 0,40%; e RS Pinus – 0,41%.

O cavaco de eucalipto produzido a partir de árvores inteiras apresentou o maior IVC. Isso pode ser explicado pela qualidade da biomassa cujo teor de umidade era baixo, cuja densidade a granel era alta e com pouca proporção de casca em relação ao material como um todo. Como já exposto anteriormente, as biomassas provenientes de resíduos de serraria têm características fora dos padrões de comercialização de biomassa – alto teor de umidade, baixa densidade a granel e alta proporção de casca em relação ao volume total processado.

4.2. Qualidade energética dos cavacos de madeira

A Figura 13 apresenta os valores do índice de qualidade energética (Q) das biomassas, resultante da Equação 4, em que se estabelece um parâmetro de comparação: um número entre 0 e 1 adimensional. Nesse sentido, quanto mais próximo de 1, melhor a qualidade da biomassa.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 13. Índice de qualidade da biomassa calculado para biomassas coletadas em fornecedores na região oeste do Paraná.

Como resultado dos fatores avaliados anteriormente, foi constatado que o CV Eucalipto, produzido a partir de árvores inteiras no campo, é a biomassa com maior qualidade dentre as avaliadas.

Apesar da biomassa de pinus não ser muito aceita pelos consumidores da região, no estudo, ela obteve um melhor índice de qualidade do combustível do que o RS Eucalipto. Isso pode ser justificado pela falta de padronização da granulometria e pela baixa densidade a granel da biomassa residual de eucalipto em relação ao RS Pinus. Esse fato reforça que a avaliação da qualidade da biomassa deve ser abrangente, não sendo somente pelo teor de umidade.

5. CONCLUSÕES

- Os teores de umidade das biomassas de eucalipto (CV Eucalipto=36,05% e RS Eucalipto=35,45%) ficaram abaixo do valor limite de 40% estipulado pelo mercado. O RS Pinus ficou acima do limite, com 46,82%;
- Com relação à densidade a granel, o CV Eucalipto obteve o melhor valor com 361,9 kg/m³, seguido pelo RS Pinus com 321,8 kg/m³ e por fim o RS Eucalipto, 229 kg/m³;
- A granulometria principal das três biomassas foi de 25 mm. Visualmente, foi possível identificar que as biomassas residuais são mais desuniformes em relação ao CV Eucalipto;
- O CV Eucalipto obteve o maior IVC, seguido pelo RS Pinus e RS Eucalipto;
- Consequentemente, o CV Eucalipto também obteve o melhor índice de qualidade da biomassa (Q);
- Mesmo o mercado preferindo as biomassas oriundas de eucalipto, no caso deste estudo, o RS Pinus obteve melhores valores energéticos comparativamente ao RS Eucalipto. Ou seja, a biomassa residual de serraria de pinus seria mais eficiente na queima em relação ao RS Eucalipto;
- A dinâmica de produção dedicada do CV Eucalipto proporciona melhores características da biomassa energética;
- RS Eucalipto e RS Pinus, por serem subprodutos da madeira serrada, têm o controle das características essenciais para garantir a qualidade energética da biomassa prejudicado;
- O controle de todo o processo produtivo da produção do CV Eucalipto proporciona a garantia de qualidade energética, sendo destacados os seguintes aspectos: Tempo de secagem; Utilização de árvores inteiras; Equipamentos dedicados;
- Considerando que atualmente a forma de precificação é atrelada somente à medição do teor de umidade, o presente trabalho contribui para a elaboração de uma metodologia ágil de medição do Índice de Qualidade da Biomassa.

5.1.Recomendações

- Estender o estudo a mais fontes de biomassas, aumentando a representatividade amostral dos resultados;
- Análise laboratorial detalhada do PCS e TC das biomassas;
- Avaliar o rendimento energético de caldeiras variando os fatores do Índice de Qualidade da Biomassa: Umidade, Granulometria e Densidade. Assim, será possível determinar com maior precisão os fatores de influência de cada variável;
- Sugerir aos consumidores de biomassa que avaliem ou contratem avaliação de qualidade de biomassa, visando a aumentar a eficiência dos processos de produção de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, W.; **Eficiência energética de um gerador de vapor, através do método indireto.** Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.4, p.124-144, 2014.

ANTIQUERA, A. C. **Cavacos no campo uma alternativa viável de colheita florestal.** In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 12., 2002, Curitiba. Anais. Curitiba: Universidade Federal do Paraná: FUPEF, 2002. p. 121-132. Painel.

AROLA, R. A. 1976 - **Wood Fuels - How do they stack up?** Forest Products Research Society, November 15-17, Atlanta, Georgia, 12 p.

ASSIS, T. F. **Melhoramento genético de Eucalyptus: desafios e perspectivas.** 3º Encontro Brasileiro de Silvicultura. Campinas, SP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012.** Brasília, DF, 2012. 148 p.

BALLONI, E.A.; SIMÕES, J.W. **O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais.** Série Técnica IPEF, v.1, n.3, p.1-16, 1980.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Área de Setores Produtivos 33. Papel e Celulose.** Brasília, p. 261-314, 2011.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MULLER, M. D.; COUTO, L. **O estado - da - arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: Um enfoque nos tratamentos silviculturais.** RENABIO-Biomassa/Energia, v.2, n.2, p.141-158, 2005

BILLO, DÂMARIS. **Tempo de secagem de árvores de Eucalyptus dunnii e ajuste das facas do picador na qualidade de cavacos para fins energéticos.** - 2019. Bil52 f. : il.

BOLZANI, G. Cavacos de Madeira para Biomassa: Máxima Energia. Wg papeis. 2016. Disponível em: <https://www.wgpapeis.com.br/news.php?news=2204#:~:text=%E2%80%9CA%20biomassa%20de%20origem%20florestal,florestais%20especificamente%20conduzidos%20para%20este>. Acesso em: 20 de julho de 2020.

BOTELHO, M.H.C.; BIFANO, H.M.- **Operação de caldeira.** São Paulo, SP, 2011.

BRAME, J. S. S. & KING, J. G. 1942 - **Fuel Solid, Liquid and Gaseous.** London, 4. a ed., Edward Arnold & Co. 422 p.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem.** 2007. 232 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná ,UFPR, Curitiba, 2007.

BRANT, P. **Uma reflexão sobre competitividade do setor de papel e celulose.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL DA INDÚSTRIA DE BASE FLORESTAL E DE GERAÇÃO DE ENERGIA. 6., 2012, Vitória. **Madeira 2012...** Vitória, 2012. p. 54-55.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira.** *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 21 n. 59, p. 185-193, 2007.s

CARON, B.O. et al. **Quantificação da biomassa florestal em plantios de curta rotação com diferentes espaçamentos.** *Comunicata Scientiae*, Bom Jesus, v. 6, p. 106-12, 2015.

CERAGIOLI, N. S. **Qualidade de cavacos produzidos em sistemas florestais de curta rotação de eucalipto para fins energéticos.** 2013. 47 f., Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2013.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia.** 1996. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG, 1996.

CHIANG, K. Y.; CHIEN, K. L.; CHENG, H. L. **Characterization and comparison of biomass produced from various sources: suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy.** *Applied Energy*, v. 100, p. 164-171, 2012.

COUTO, L; MÜLLER, M. D. **Florestas Energéticas no Brasil.** In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). *Biomassa para Energia*. 1 ed. Campinas: Editora da Unicamp, v. 1, p. 93-108, 2008.

DEBONI, T. L. **Qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia por uma unidade cogeneradora em Lages-SC.** Dissertação de mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages – SC, 2017.

ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRA.; **Manual no uso de Vapor.** São Paulo, SP, 2005 b, 95 p

FERREIRA, T. S. *et al.* **Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes idades e componentes de árvores de *Pinus taeda*.** In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 1., 2007, Belo Horizonte

FOELKEL, C. E. B. **O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento.** *Grau Celsius*, 2009.

GARCIA, E. A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; MACHADO F.C.; MAZIERO, F. L. **A energia da madeira em floresta de eucalipto**. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 40, 2011, Cuiabá. Anais...Cuiabá: CONBEA, 4 p.

GARSTANG, J. et al. **Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, nonventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices**, 2002.

GUERRA, S. P. S. et al. **Eucalipto adensado: manejo para florestas energéticas**. In: LEMOS, E. G. M. ;NELSON, R. S. (Ed.). *Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação*. São Paulo: Cultura Acadêmica2012. p.125-161.

HANKIN, C. & MITCHELL, C.P. **Wood biomass transport systems**. IEA/BA T9/A6, Rport N. 2, s.d. 31 p.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba-PR. 2008.

KOBYLARZ, R. **Qualidade energética de cinco espécies florestais da Amazônia**. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia industrial Madeireira. Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2016.

KOLLMANN, F.P.T.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J.; **Principles of wood science and technology II: wood based materials**. 2. ed. Berlin; Springer-Verlag, 1975. v. 2. LIPPEL. **Cavacos de madeira**. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/cavacos-de-madeira#.V0He8VQr11J>. Acesso em: Dezembro 2020.

MACHADO, C. C. **O setor florestal brasileiro**. In: **MACHADO, C.C. Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014.

MALINOVSKI, R. A. *et al.* **Otimização da distância de extração de madeira com forwarder**. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 171-179, 2008.

MARQUES, A. P.; MENDONÇA FILHO, W. F.; **Análise da produtividade e eficiência operacional do sistema cavaqueamento**. In: **xv seminário de atualização de colheita de madeira e transporte florestal**, Anais... Curitiba, p. 281-282, 2008.

MIRANDA, M. A. S.; **Máxima Energia**. Revista BForest 2016. Disponível em: <https://revistabforest.com.br/wp-content/uploads/2016/10/B.Forest-A-Revista-Eletr%C3%B4nica-do-Sector-Florestal-Edi%C3%A7%C3%A3o-25-Ano-03-N%C2%B0-10-Outubro-2016.pdf-Download.pdf>. Acesso em: 01 de julho de 2020.

MOERS, É. M.; VIEIRA, A. C.; FERNANDES, D. M.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A. **Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. In: **Congresso Latino Americano de Suinocultura e**

Sustentabilidade Ambiental, 1, 2011, Foz do Iguaçu, Anais...Foz do Iguaçu: COLASSA, 11 p.

NOGUEIRA, L. A. H. *et al.* **Dendrologia: fundamentos e aplicações.** Brasília: ANEEL, 2000.

OLIVEIRA, J.T.S. *et al.* **Variação do teor de umidade da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto.** Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115- 127, 2005.

PARHAM, R. A. **Wood defects.** In: KOCUREK, M. J.; STEVENS, C. F. B. (Ed.). *Pulp and paper manufacture.* 3rd. ed. Montreal: Canadian Pulp and Paper Association, 1983. p. 66-79.

PUROHIT, N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, 1987. p.177-182.

RODRIGUES, C. K. **Colheita e transporte florestal.** Curitiba: [s.n.], 2018.

RIBEIRO, F.A.; ZANI FILHO, J. **Variação da densidade básica da madeira em espécies/ procedências de Eucalyptus spp.** IPEF, v.46, p.76-85, 1993.

RIGNEL, D. G. S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. **Uma introdução a lógica fuzzy.** Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica, Vol. 01, Nr. 01, 2011.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. **Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de Eucalyptus plantados em diferentes locais.** Revista *Árvore* (Impresso), v. 36, p. 971-980, 2012.

SARTÓRIO, I. P. **Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba, 2014 136 f. : il.

SMITH, A. D. 1976 - **Wood as fuel.** Foster Wheeler Limited. Mimeograph. 32 p.

SCHROEDER, F. **Determinação do teor de umidade e densidade aparente do cavaco de *pinus spp.* Sob diferentes condições de armazenamentos.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade tecnológica federal do Paraná, UTFPR, Dois Vizinhos – PR, 2017.

SHIMOYAMA, V.R.S.; BARRICHELO, L.E.G. **Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de Eucalyptus spp.** In: Congresso Anual de Celulose e Papel, 24, 1991, São Paulo. Anais... São Paulo, ABTCP, 1991. p.178-183.

STENZEL, G. **Logging and pulpwood production**. New York: Ronald Press. p. 453, 1972.

VALVERDE, S.R.; MAFRA, J.W.A.; MIRANDA, M. A., SOUZA, C.S.; VASCONCELOS, D. C. **Silvicultura brasileira- oportunidades e desafios da economia verde**, 2012.

VARANDA, L.D.; CARASCHI, J.C.; ALMEIDA FILHO, F. **Potencial energético do carvão vegetal de bambu**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, XII, 2010, Lavras 2010.

VEIGA, N. S. **Inferência da densidade da madeira estimada por esclerometria**. Campinas, SP : [s.n.], 2014.

VITAL, B.R. et al. **Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de Eucalyptus grandis cultivado na região do cerrado de Minas Gerais**. Brasília: IBDF, 1987. p.49-52. (Boletim Técnico, 8).

WATSON, W. F.; FLANDERS, L. N.; DUBOIS, M. R. et al. **Cost comparison at the woodyard chip pile of clean woodland chips and chips produced in the woodyard from roundwood**. Pulping Conference, p 183 – 189, 1991.