



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA

**VIABILIDADE ECONOMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL**

**Botucatu
2023**

ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Energia na Agricultura.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maura Seiko Tsutsui Esperancini

**Botucatu
2023**

S729v Souza, André Gustavo Oliveira
Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica a partir de biomassa florestal / André Gustavo Oliveira Souza. -- Botucatu, 2023
97 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientadora: Maura Seiko Tsutui Esperancini

1. Biomassa Florestal. 2. Cogeração de energia elétrica. 3. Viabilidade econômica. 4. Bioenergia. 5. Poder calorífico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

VIABILIDADE ECONOMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL

AUTOR: ANDRÉ GUSTAVO OLIVEIRA SOUZA

ORIENTADORA: MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura), pela Comissão Examinadora:

Mauro Esperancini
Prof.^a Dr.^a MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Mauro Esperancini
Prof. Dr. JOSE CLAUDIO CARASCHI (Participação Virtual)
Cursos de Engenharia Industrial Madeireira e Engenharia de Produção / UNESP Campus de Itapeva

Paulo André de Oliveira
Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Luiz Cesar Ribas
Prof. Dr. LUIZ CESAR RIBAS (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Mauro Esperancini
Prof. Dr. PAULO FERNANDO DO NASCIMENTO AFONSO (Participação Virtual)
/ Faculdades Integradas de Jau

Botucatu, 01 de junho de 2023.

*A minha querida esposa e filhos,
Juliana, Felipe Augusto e Manuela,
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, força e sabedoria para enfrentar os desafios diários.

A minha querida esposa Juliana, pelo apoio fundamental e incondicional, pelo carinho e compreensão durante todo o tempo que dediquei a realização deste trabalho.

Aos meus filhos, Felipe Augusto e Manuela por todo carinho, compreensão e palavras de incentivo.

Aos meu país, Jarbas e Ligia, por todas as orações e dedicação na minha formação de meu caráter.

A minha orientadora, Professora Doutora Maura Seiko Tsutsui Esperancini, por contribuir na minha formação como pesquisador. Agradeço pelas horas dedicadas na minha formação, revisão e orientação desta tese.

Ao Professor Doutor Saulo P. S. Guerra, pela confiança, parceria e coorientação informal do meu trabalho e no meu desenvolvimento pessoal.

Ao Professor Doutor Humberto de Jesus Eufrade Junior pelas dicas valiosas durante a condução do trabalho.

Ao Professor Doutor Valter de Souza pelas orientações e palavras de incentivos que tanto contribuíram para a realização deste trabalho.

À empresa Duratex S.A. que contribuiu com a minha formação profissional.

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), em especial aos docentes e funcionários do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia que me acolheram durante o doutorado.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Energia na Agricultura pela oportunidade de cursar o doutorado.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento desta tese e que por um breve momento não contemplei nesta dedicatória.

“Rendei graças ao Senhor, porque ele é bom, porque a sua misericórdia dura para sempre” (Salmos 118:1-29, tradução Almeida Revista e Atualizada).

RESUMO

A indústria de base florestal tem integrado soluções tecnológicas para aproveitamento dos seus resíduos lignocelulósicos. Particularmente, para as indústrias de painéis de madeira são geradas quantidades expressivas de resíduos no recebimento, processamento primário da madeira no pátio e ao longo processo industrial. Ainda hoje, os condicionantes logísticos e de processamento destes resíduos como a densificação em briquetes, além do seu potencial energético para substituição de combustíveis fósseis para geração de energia térmica e elétrica ainda não foram estudados por completo. Assim, este trabalho investigou a viabilidade técnico-econômica dos resíduos lignocelulósicos de uma indústria de painéis de madeira como fonte alternativa ao uso do gás natural e também para complementar a demanda de cavacos de madeira para a geração de energia. Para isso, foram levantados os indicadores econômicos sob condições de risco pelo método de Monte Carlo para o aproveitamento de resíduos de cascas picadas e aqueles provenientes do processo produtivo de painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*) e MDP (*Medium Density Particleboard*). Adicionalmente, houve a caracterização das propriedades físicas e químicas dos resíduos a fim de comparar seu desempenho energético com a madeira picada, tradicionalmente utilizada na indústria. Os resíduos lignocelulósicos apresentaram um poder calorífico útil próximo a 15 MJ kg^{-1} , sendo que os briquetes de MDF apresentaram menor teor de cinzas (1,1%) que os demais. Os resultados ainda mostraram que as diferentes rotas tecnológicas estudadas são viáveis economicamente mesmo adotando uma taxa mínima de atratividade de 18% (TMAR) muito acima das taxas de juros praticadas no mercado. Os projetos são afetados por flutuações nos preços de eletricidade, gás natural e sobretudo do preço do cavaco de madeira. Nas condições avaliadas, mais da metade (59,4%) da demanda energética mensal de uma caldeira poderia ser suprida com utilização dos briquetes de cascas e de resíduos do processo produtivo de MDF e MDP. As novas rotas tecnológicas estudadas são alternativas para redução dos resíduos industriais e contribuem para a valorização da biomassa e a sustentabilidade ambiental do setor de florestas plantadas.

Palavras-chave: bioenergia; indústria de painéis de madeira; poder calorífico; método de Monte Carlo.

ABSTRACT

The forest-based industry has integrated technological solutions for the use of its lignocellulosic residues. Particularly for the wood panel industries, expressive amounts of waste are generated in the receipt and primary processing of wood in the yard and also throughout the industrial process. Even today, the logistical and processing constraints of these residues, such as densification into briquettes, in addition to their energy potential for replacing fossil fuels for thermal and electrical energy generation, have not yet been fully studied. Thus, this work investigated the technical-economic viability of lignocellulosic residues from a wood panel industry as an alternative source to the use of natural gas and also to complement the demand for wood chips for energy generation. For this, economic indicators under risk conditions were collected using the Monte Carlo method for the use of chopped bark residues and those from the production process of MDF (Medium Density Fiberboard) and MDP (Medium Density Particleboard) panels. Additionally, there was the characterization of the physical and chemical properties of the waste in order to compare its energy performance with chopped wood, traditionally used in the industry. The lignocellulosic residues had a useful calorific power close to 15 MJ kg^{-1} , and the MDF briquettes had a lower ash content (1.1%) than the others. The results also showed that the different technological routes studied are economically viable even adopting a minimum rate of attractiveness of 18% (TMAR) far above the interest rates practiced in the market. Projects are affected by fluctuations in the prices of electricity, natural gas and, above all, the price of wood chips. Under the evaluated conditions, more than half (59.4%) of the monthly energy demand of a boiler could be met using briquettes from bark and waste from the MDF and MDP production process. The new technological routes studied are alternatives for reducing industrial waste and contribute to the valorization of biomass and the environmental sustainability of the planted forest sector.

Keywords: bioenergy; wood panel industry; calorific value; Monte Carlo method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Revisão de Literatura

Figura 1 – Oportunidades e rotas da biomassa e resíduos florestais ao longo da cadeia de geração de energia	27
Figura 2 – Processo de produção de painéis de fibras de média densidade (MDF, ou <i>Medium Density Fiberboard</i>)	30
Figura 3 – Processo de produção de painéis de madeira aglomerada (MDP, ou <i>Medium Density Particleboard</i>)	31

Capítulo 2 Viabilidade técnica e econômica da biomassa residual densificada da indústria de painéis de madeira para geração de energia térmica

Figura 1 – Esquema do processo de briquetagem	63
Figura 2 – Briquetadora para compactação dos resíduos	64
Figura 3 – Desenho esquemático da briquetadora	65
Figura 4 – Formas das biomassas florestais	67
Figura 5 – Variação do preço de cavacos de madeira em R\$ por tonelada posto na fábrica no período de 01/2018 a 02/2023	70
Figura 6 – Custo das formas da biomassa residual posto em fábrica em diferentes distâncias	77
Figura 7 – Valor Presente Líquido da utilização da biomassa residual briquetada ...	81

LISTA DE TABELAS

Revisão de Literatura

Tabela 1 – Caracterização física e química de biomassas e resíduos florestais.....	28
--	----

Capítulo 1 Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica a partir de biomassa florestal em uma indústria de painéis de madeira em substituição ao gás natural

Tabela 1 – Investimento inicial para ambas as rotas tecnológicas.....	42
Tabela 2 – Fluxo energético – Rotas tecnológicas.....	47
Tabela 3 – Despesas operacionais adicionais em ambas as rotas tecnológicas	48
Tabela 4 – Análise de custo/benefício dos projetos, incluindo custos adicionais	49
Tabela 5 – Fluxo de caixa e Fluxo de caixa descontado.....	50
Tabela 6 – Indicadores e análise de viabilidade do projeto	51

Capítulo 2 Viabilidade técnica e econômica da biomassa residual densificada da indústria de painéis de madeira para geração de energia térmica

Tabela 1 – Parâmetros e consumo mensal da caldeira.....	61
Tabela 2 – Investimento do sistema de briquetagem	65
Tabela 3 – Outros parâmetros da usina de briquetagem projetada	66
Tabela 4 – Normas e metodologia dos ensaios laboratoriais.	67
Tabela 5 – Caracterização física e química dos resíduos estudados.....	71
Tabela 6 – Quantidade de biomassa (em toneladas) após briquetagem, descontadas as perdas do processo.....	73
Tabela 7 – Frete em reais por tonelada das diferentes formas de biomassas florestais para uma distância de 230 km.....	74
Tabela 8 – Custo operacional mensal detalhado do processo de briquetagem	75
Tabela 9 – Custo total (R\$ mês ⁻¹) do aproveitamento das biomassas residuais nas diferentes operações consideradas	76
Tabela 10 – Parâmetros e consumo mensal da caldeira em diferentes cenários de uso	78
Tabela 11 – Quantidade de biomassa e custo operacional mensal, no mesmo período de tempo, para abastecimento da caldeira em diferentes rotas tecnológicas	78

Tabela 12 – Fluxo de caixa e Fluxo de caixa descontado	79
Tabela 13 – Indicadores e análise de viabilidade do projeto	80
Tabela 14 – Valor Presente Líquido sob condições de risco	82
Tabela 15 – Análise de sensibilidade da utilização da biomassa residual briquetada	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CF	Carbono fixo (%)
CZ	Cinzas (%)
DA	Densidade aparente à granel (kg m^{-3})
DB	Densidade básica (kg m^{-3})
DE	Densidade energética estima (MJ m^{-3})
EN	European Standard
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
MV	Materiais voláteis (%)
PB	<i>Payback</i> econômico (anos)
PCS	Poder calorífico superior (MJ kg^{-3})
PCU	Poder calorífico útil (MJ kg^{-3})
TMA	Taxa mínima de retorno aceitável (%)
TIR	Taxa interna de retorno (%)
UBU	Umidade base úmida (%)
VPL	Valor presente líquido (R\$)
CUB	Custo unitário básico da construção civil

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	21
REVISÃO DE LITERATURA.....	24
A geração de energia a partir da biomassa no Brasil e no mundo	24
A biomassa florestal como recurso energético	26
A indústria de painéis de madeira, seus resíduos lignocelulósicos e a cogeração de energia.....	29
Análise econômica de projetos de geração de energia sob condições de risco.....	32
 CAPÍTULO 1 VIABILIDADE ECONOMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL EM UMA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA EM SUBSTITUIÇÃO AO GÁS NATURAL 36	
1.1 INTRODUÇÃO	37
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS	39
1.2.1 <i>Objeto de estudo</i>	39
1.2.2 <i>Metodologia</i>	40
1.2.3 <i>Investimentos iniciais</i>	40
1.2.4 <i>Custos Operacionais do Sistema</i>	43
1.2.5 <i>Renda Adicional do Projeto</i>	43
1.2.6 <i>Horizonte de Planejamento, Taxa Mínima de Retorno Aceitável (TMA) e Indicadores de Viabilidade Econômica</i>	44
1.2.7 <i>Valor Presente Líquido (VPL)</i>	44
1.2.8 <i>Taxa Interna de Retorno (TIR)</i>	45
1.2.9 <i>Payback Econômico (PB)</i>	45
1.3 RESULTADOS	46
1.3.1 <i>Fluxo Energético</i>	46
1.3.2 <i>Custos Operacionais Adicionais</i>	47
1.3.3 <i>Renda Adicional do Projeto</i>	48
1.3.4 <i>Fluxo de Caixa, Fluxo de Caixa Descontado, Horizonte de Planejamento, Taxa Mínima de Retorno Aceitável e Indicadores de Viabilidade Econômica</i>	49
1.4 DISCUSSÃO	51
1.5 CONCLUSÕES	54

	CAPÍTULO 2 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA BIOMASSA RESIDUAL DENSIFICADA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA	58
2.1	INTRODUÇÃO.....	59
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	61
2.2.1	<i>Cadeia de operações da indústria de painéis de madeira e cenários propostos</i>	61
2.2.2	<i>Densificação e caracterização física e química dos resíduos lignocelulósicos.....</i>	63
2.2.3	<i>Propriedades físicas e químicas dos resíduos lignocelulósicos</i>	66
2.2.4	<i>Análise econômica do projeto sob condições de risco</i>	68
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
2.3.1	<i>Caracterização da biomassa residual e seu efeito no processo de densificação</i>	71
2.3.2	<i>Consumo energético mensal, custos transporte e briquetagem.....</i>	73
2.3.3	<i>Rotas tecnológicas e análises econômicas</i>	77
2.3.4	<i>Simulações de Monte Carlo</i>	80
2.4	CONCLUSÕES.....	84
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
	REFERÊNCIAS	91

INTRODUÇÃO GERAL

A economia global é baseada principalmente em combustíveis fósseis para produção de eletricidade, calor, produtos químicos e energia. Na matriz energética global, o petróleo, carvão mineral e gás natural, representam juntos 81% do total, já a energia nuclear representa 5% e as fontes de energia renováveis aproximadamente 14% (Popp *et al.* 2021). Nesta última, destaque para a biomassa lignocelulósica, que vem ganhando espaço nas últimas décadas, como alternativa na geração de energia térmica, mecânica e elétrica (Londo *et al.*, 2018), sobretudo pelos esforços de redução das emissões de gases causadores do efeito estufa a fim de mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Shukla *et al.*, 2022).

No Brasil, as fontes renováveis somam 44,7% da matriz energética nacional, sendo que os produtos derivados da biomassa agrícola (especialmente a cana-de-açúcar) e florestal (lenha e carvão vegetal) contribuem com mais da metade dessa participação. Quando analisadas em relação à energia elétrica gerada no país, os combustíveis renováveis têm uma participação ainda maior (78,1%) e a biomassa se consolida como a terceira fonte renovável mais importante, apenas atrás das hidrelétricas e as usinas eólicas (Brasil, 2022).

Diversos setores evoluíram na transformação de resíduos da biomassa em fontes renováveis de energia e investiram em instalações industriais que produzem energia elétrica para consumo próprio (Santos, 2018, Brasil, 2022). Um dos maiores exemplos é o setor de base florestal, caracterizado pelas indústrias de celulose e papel, carvão vegetal, madeira e móveis, que engloba 124 termelétricas movidas a biomassa, correspondendo a 25% (ou 4,4 GW) capacidade fiscalizada de geração de energia térmica brasileira (ANEEL, 2023). Neste caso, evidencia-se o enorme potencial deste setor na utilização de outros resíduos do processo produtivo para a cogeração de energia a exemplo da queima do licor negro na produção de celulose e papel, como aqueles provenientes das indústrias de painéis de madeira de reflorestamento, que são gerados tanto no recebimento e processamento primário da madeira no pátio (como, as cascas picadas), quanto nas linhas industriais para fabricação de painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*) e MDP (*Medium Density Particleboard*) (Romaní *et al.*, 2019; Molin Filho, 2020).

Nas indústrias moveleiras da região de UBÁ, no Estado de Minas Gerais, Farage *et al.* (2013) estudaram resíduos de madeira maciça e resíduos de MDF,

encontrando valores caloríficos de 16,8 MJ kg⁻¹ a 19,74 MJ kg⁻¹ e, em geral, baixo teor de cinzas, que justificariam o reaproveitamento energético destes resíduos.

Os resíduos florestais são utilizados para gerar energia principalmente por meio da queima em caldeiras (57,2%), sendo que 8,9% são reutilizados como matéria-prima em outros processos industriais (IBÁ, 2021). Apesar do potencial energético, a indústria brasileira de processamento de madeira tem um baixo aproveitamento de resíduos de biomassa (40%), sendo o restante é descartado (Furtado *et al.*, 2010). Considerando ainda que o setor possui uma das maiores carteiras de investimentos do mundo, sendo que estão em andamento ou foram anunciados R\$ 60,4 bilhões de aportes em florestas, P&D e novas unidades fabris no Brasil para os períodos de 2022 a 2028 (IBÁ, 2022), espera-se que a produção de resíduos florestais continue aumentando significativamente nos próximos anos.

De fato, o uso da biomassa florestal e outros resíduos lignocelulósicos em projetos industriais depende da viabilidade econômica dos investimentos para a conversão da biomassa em energia, incluindo a aquisição de equipamentos; o custo de transporte e manuseio e densificação do material, e o conhecimento da composição do material, como a densidade energética e o teor de umidade, bem como o preço da energia gerada por fontes tradicionais já utilizadas (Brand; Muñiz; Quirino; Brito, 2011; Acuna *et al.*, 2012; Sosa *et al.*, 2015; Eufrade-Junior, 2019).

A capacidade de prever o que pode acontecer no futuro, avaliar os riscos e incertezas de substituição das fontes de energia podem ser associados a um sistema de gestão de riscos (Aven, 2012), sendo a análise de risco uma ferramenta útil na tomada de decisão. Sabe-se que os investimentos em bioenergia requerem investimentos de longo prazo e sua lucratividade está diretamente relacionada às variações de preços nos mercados de combustíveis e energia, o que pode afetar os resultados econômicos do empreendimento (Trømborg *et al.*, 2011). Particularmente, na geração de energia elétrica no Brasil, as questões climáticas (como, o volume e localização das chuvas) são fatores importantes para a oscilação de preços da eletricidade ao longo do ano, já que mais da metade (53%) do total de eletricidade é produzida pelas hidrelétricas. Em 2021, a escassez das chuvas culminou no acionamento de termoeletricas movidas à combustível fóssil, principalmente, o carvão mineral e o gás natural (Brasil, 2022), que somada a falta de políticas públicas e de planejamento energético, culminaram no aumento demasiado do preço da eletricidade no país.

Para lidar com a incerteza no processo de tomada de decisões é possível simular uma abordagem comportamental estatística que aplica distribuições de probabilidades predeterminadas e valores aleatórios para estimar resultados de risco em uma série contínua de compensações entre risco e retorno a partir de um banco de dados existentes, cita-se por exemplo, o método de Monte Carlo (Gitman, 2008; Brealey; Myers; Marcus, 2019). Por meio da análise de Monte Carlo é possível explorar os condicionantes críticos no processo de uso da biomassa para geração de energia, como o preço da biomassa, custo de transporte ou aquisição de materiais.

A fim de propor uma alternativa mais limpa do ponto de vista ambiental, este trabalho teve como objetivo principal estudar a viabilidade econômica de diferentes rotas tecnológicas para geração de energia térmica e elétrica a fim de substituir o uso de combustíveis fósseis por cavacos de madeira e outros resíduos lignocelulósicos provenientes de uma indústria de painéis de madeira. Teve, ainda, como objetivos específicos:

- Apropriar os custos e investimentos necessários, bem como os indicadores econômicos para substituição do gás natural por biomassa florestal na busca pela autossuficiência de energia térmica fabril, com e sem cogeração de eletricidade;
- Investigar a densificação, na forma de briquetes, dos resíduos de pó de madeira (lixadeira), finos de peneiras e casca de eucalipto picada como alternativa para queima direta em caldeiras, bem como caracterizar suas propriedades físicas e químicas;
- Estudar as variáveis críticas, o preço dos cavacos de madeira, custos logísticos até a indústria e o valor do investimento necessário em equipamentos, que poderiam inviabilizar o aproveitamento energético dos resíduos lignocelulósicos na indústria;
- Realizar a análise econômica das rotas tecnológicas com os resíduos densificados para atender a geração de energia térmica em caldeiras industriais sob condições de risco pelo Método de Monte Carlo.

REVISÃO DE LITERATURA

A geração de energia a partir da biomassa no Brasil e no mundo

A produção de biomassa e seu potencial renovável para produzir bioenergia varia entre os países, dependendo da geografia, disponibilidade de recursos, biodiversidade e tecnologia disponível. Em todo o mundo, os biocombustíveis são produzidos a partir do milho, trigo, cana-de-açúcar, soja e girassol, que também são utilizados na indústria de alimentos, sendo este motivo presente nas discussões internacionais, sobretudo na Europa, onde especula-se que o aumento da utilização de matéria prima para fabricação de biocombustíveis possa aumentar os preços dos alimentos (Antar *et al.*, 2021; Popp *et al.*, 2021). Já no Brasil, a questão é minimizada dada a extensão territorial e condições favoráveis para o cultivo agrícola e florestal, e ainda, o equilíbrio da demanda e consumo interno do país, o faz ocupar uma cadeira de destaque na exportação de biomassa para energia, que cresce continuamente (Bondarik; Pilatti; Horst, 2018).

Na matriz elétrica brasileira, o setor sucroalcooleiro foi pioneiro no uso do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para gerar energia elétrica para autoconsumo e para venda a distribuidores. Devido ao volume produzido, a palha (palha moída derivada da cana-de-açúcar) está sendo amplamente utilizada para a produção de eletricidade. Com a intensificação do volume de produção, recursos que eram pouco utilizados até recentemente, como o palhiço, também estão sendo destinados para a produção de eletricidade (Santos, 2018; Denadai, 2018). No país, a utilização de biomassa como fonte de fornecimento de energia elétrica supera as instalações fotovoltaicas e, atualmente, mais de 500 usinas movidas à biomassa, como bagaço de cana de açúcar, licor negro, capim elefante, casca de arroz, lenha e resíduos florestais têm capacidade instalada de 15,8 GW, correspondendo a 8,6% da matriz elétrica nacional (ANEEL, 2023).

Dentre as biomassas utilizadas como combustíveis, aquelas de origem florestal tem se tornado estratégica para os países. No cenário brasileiro, embora o uso do bagaço de cana para a geração de energia elétrica seja um recurso abundante com produção descentralizada, não é possível produzir calor e energia de forma direta e contínua, já que é gerado de forma sazonal e há necessidade de estocagem nos pátios nos períodos entressafras, que resultam em perdas e ineficiência do processo (Pereira *et al.*; 2019). De outro ponto de vista, os recursos

madeireiros têm a vantagem de não concorrer diretamente com a produção de alimentos, além disso há ainda um enorme potencial não explorado (Popp *et al.*, 2021). De acordo com o estudo do Departamento de Energia dos EUA, os resíduos de biomassa do manejo florestal têm o potencial de fornecer entre 16,2 e 18,9 milhões de toneladas de biomassa por ano para energia (Campbell *et al.*, 2018).

O Brasil é referência mundial em plantações comerciais com alta produtividade e ciclo de rotação curto para produção de biomassa florestal. Além das condições de clima e solo, o setor de florestas plantadas investe em pesquisa e desenvolvimento das melhores técnicas de manejo, aliados ao melhoramento genético e práticas sustentáveis, apresentando uma produção anual de 36,8 m³/ha de madeira de eucalipto e 30,4 m³/ha para madeira de pinus, sendo que as duas espécies juntas estão presentes em 96% dos 9,55 milhões de hectares plantados no país (IBÁ, 2021). Além disso, o setor de base florestal brasileiro é um dos maiores produtores mundiais em diferentes segmentos, só em 2021, a receita do setor movimentou R\$ 244,6 bilhões no país e produziu 22,5 M t celulose, 10,7 M t de papel, 8,9 M t de painéis de madeira, 13,8 M t de pisos laminados, 10,2 M t de madeira serrada e 4,25 M t de carvão vegetal (IBÁ, 2022).

A busca por fontes alternativas de energia pode ser uma solução para reduzir os problemas associados a geração centralizada de energia elétrica brasileira. Tal benefício é possível pois nos sistemas de geração distribuída a unidade de geração está localizada próxima à carga permitindo, ainda, a redução das perdas associadas ao transporte de energia nas linhas de transmissão. Entretanto, a inserção de novas fontes de energia no setor enfrenta preconceitos criados pela estrutura da geração centralizada e com isso, surgem barreiras que dificultam esse avanço tecnológico como as barreiras econômicas, técnicas, ambientais, regulatórias e administrativas, políticas, financeiras, infraestrutura e de mercado. (Soccol *et al.*, 2016).

Embora o uso de recursos madeireiros seja promissor para o desenvolvimento tecnológico dos países, existem desafios técnicos e logísticos associados à produção de energia a partir de biomassa florestal que podem reduzir a viabilidade econômica de projetos na área, como a volatilidade dos preços de mercado para combustíveis fósseis, que pode tornar arriscados os investimentos e frear o crescimento da capacidade da indústria, particularmente durante períodos de preços baixos. Uma alternativa seria promover incentivos econômicos como o crédito de carbono a partir de combustíveis verdes e isso pode acontecer à medida

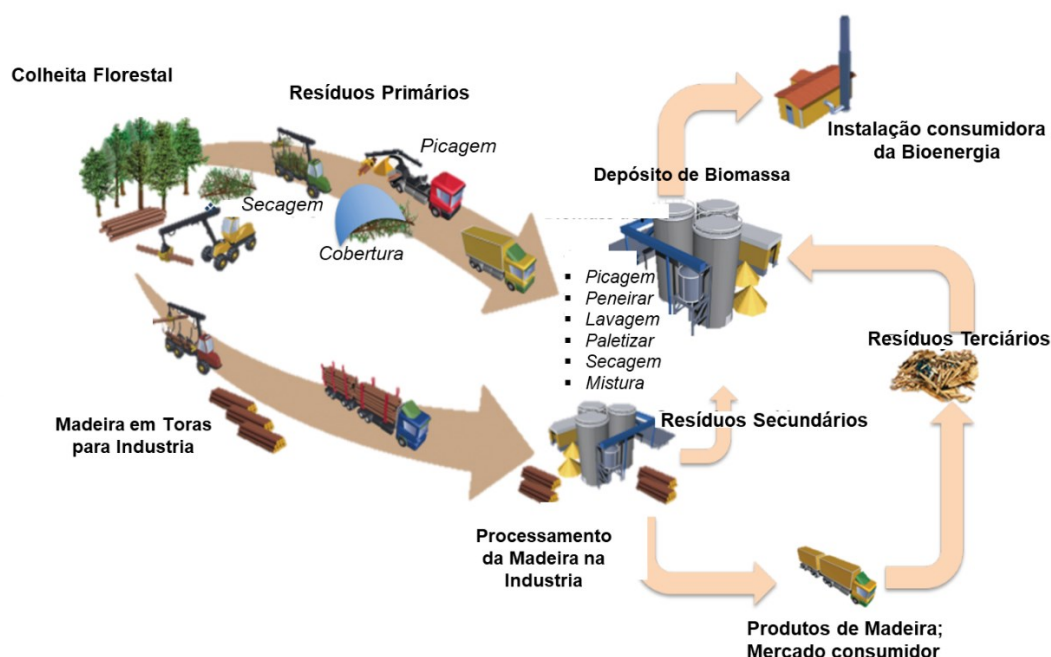
que as políticas públicas evoluem em países interessados na questão (Campbell *et al.*, 2018). De acordo com Bondarik; Pilatti; Horst (2018), o Brasil adotou várias estratégias para incentivar fontes de energia renováveis alternativas na busca de uma produção de energia mais limpa e sustentável, sendo que para este fim, as estratégias devem apoiar a redução do risco financeiro para potenciais investidores neste mercado.

A biomassa florestal como recurso energético

A biomassa de origem florestal é uma matéria-prima renovável e inclui o lenho, galhos, tocos, raízes, copas e cascas das árvores. Especificamente os resíduos madeireiros ou lenhosos possuem uma ampla variedade de usos, incluindo a produção de madeira serrada, celulose e papel, carvão vegetal, geração de calor e eletricidade, além do potencial de produzir biocombustíveis líquidos – como o etanol de segunda geração, e gasosos – gás de síntese e o biogás (Kumar *et al.*, 2021; Braghiroli; Passarini, 2020). Dentre os usos citados, aquele destinado para propósito energético tem papel preponderante na sociedade, sendo que 49% da produção de madeira no mundo (o equivalente a 1,93 bilhões de metros cúbicos) ainda é destinada para este fim (Thiffault *et al.*, 2023). Não menos importante, sua utilização é estratégica para a busca de um futuro de baixo carbono a fim de mitigar os efeitos das mudanças climáticas (FAO, 2016; Geng et al, 2017; Shukla *et al.*, 2022).

Na cadeia produtiva de geração de energia no Brasil (Figura 1), a biomassa é proveniente de plantações florestais com propósitos comerciais, como os plantios das espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*, que atendem uma gama de processos industriais. Desta forma, a madeira pode ser utilizada em diversas formas, como carvão vegetal; lenha para queima direta em fornos pequenos (pizzarias, padarias e residências) ou industriais (olarias); podem ser picados para abastecer usinas termelétricas a vapor, sistemas de gaseificação da madeira para produção de calor industrial; combustível para motores e turbinas, gás redutor para siderurgia, gás de síntese para metanol, amônia e outros; e por último na forma de resíduos gerados tanto na colheita florestal ou processos industriais (serragem, maravalhas, moinha de carvão e licor negro) aproveitados em sistemas de cogeração, usinas termelétricas e refinarias de biomassa (Müller, 2005).

Figura 1 – Oportunidades e rotas da biomassa e resíduos florestais ao longo da cadeia de geração de energia



Fonte: Adaptado de Thiffault *et al.* (2018).

Os recursos madeireiros quando utilizados nas linhas e processos industriais são geralmente reduzidos a pequenos pedaços, denominados de cavacos de madeira, que são classificados de acordo com sua utilização, comercialmente possuem 20 e 40 mm, respectivamente para a largura e comprimento, e 4 a 6 mm de espessura (Belini *et al.*, 2008; Foelkel, 2009). Já outros resíduos lignocelulósicos provenientes da indústria florestal são disponibilizados com dimensões características do processo de origem, seja na forma fibras (a exemplo de resíduos provenientes da fabricação de painéis MDF - *Medium Density Fiberboard*) ou até mesmo líquido (como o licor negro de indústrias de celulose e papel que utilizam o processo de polpação Kraft). De fato, cada biomassa citada deve ser encaminhada para um pré-tratamento específico a fim de permitir seu aproveitamento industrial. Em materiais particulados ou à granel, indica-se realizar o processo de densificação do material, seja por meio da briquetagem ou peletização a fim de aumentar sua densidade energética e facilitar o manuseio e comercialização do produto.

A matéria-prima lignocelulósica é composta principalmente de celulose, hemicelulose e lignina em proporções variadas, seja em função da espécie florestal ou mesmo das diferentes frações da biomassa que a compõe (Sheng; Azevedo,

2005; Braghiroli; Passarini, 2020). Essa variabilidade confere diferentes valores de propriedades físicas (como, densidade básica e umidade) e químicas (poder calorífico e análise imediata) as biomassas, sendo algumas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização física e química de biomassas e resíduos florestais

Biomassas florestais	PCS	DB	CZ	CF	MV	Referencias
	MJ kg ⁻¹	kg m ⁻³	%	%	%	
Madeira de eucalipto	20,1	640	0,1	18,1	81,8	Crisóstomo <i>et al.</i> (2021)
Madeira de Pinus	20,5	393	0,5	17,5	82,0	Delucis <i>et al.</i> (2017)
Carvão de eucalipto	29,1	380	0,1	66,8	33,1	Crisóstomo <i>et al.</i> (2021)
Carvão de pinus	30,6	290	0,4	61,3	38,3	Crisóstomo <i>et al.</i> (2021)
Casca de pinus	21,4	372	1,1	28,8	70,1	Delucis <i>et al.</i> (2017)
Toco de eucalipto	17,6	477	0,7	18,9	80,4	Guerra; Eufrade-Junior (2019)

NOTA: PCS – Poder calorífico superior; DB – Densidade básica; CZ – cinzas; CF – Carbono fixo; e MV – Materiais voláteis.

A umidade da biomassa pode variar dependendo do período de estocagem e do produto final, sendo comum os valores de 53 e 30% respectivamente para a biomassa recém-colhida e seca ao ar, e valores 7 e 11% para produtos densificados, como briquetes e *pellets* (Souza; Vale, 2016; Eufrade-Junior *et al.*, 2021). Já o conteúdo energético também é imprescindível na combustão da biomassa, sendo encontrados na literatura valores de poder calorífico superior (PCS) para a madeira de 17 MJ kg⁻¹ a 22,2 MJ kg⁻¹ para resíduos florestais, incluindo a frações de folhas, cascas e tocos (Eufrade-Junior *et al.*, 2016; Guerra; Eufrade-Junior, 2019). Em termos operacionais, utiliza-se o poder calorífico útil ou líquido (PCL) que é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas devido a umidade (Telmo; Lousada, 2011).

A amplitude de valores encontrada na composição da biomassa somada a necessidade de avaliar diferentes formas dos produtos (briquetes, *pellets*, materiais picados ou outros) fazem com que as características químicas, bem como as

condições de umidade e a quantidade de calor do produto final devam ser comparadas em única variável, sendo essa, a densidade energética, que é resultado do produto do poder calorífico útil e a densidade aparente da biomassa (Souza; Vale, 2016; Crisóstomo *et al.*, 2021),

As características da biomassa e seus resíduos têm implicações operacionais e econômicas em toda as etapas da cadeia produtiva desde a o transporte, estocagem no campo e no pátio da indústria, arranjo dos sistemas de conversão de energia e até mesmo comercialização. Neste último quesito, cita-se como o exemplo a não exportação de *pellets* de eucalipto do Brasil para a Europa devido ao alto teor de cloro (em torno de 0,1%), que é muito acima do permitido pelos órgãos de fiscalização e normas internacionais de até 0,02% (Oberberger; Brunner; Bärnthaler, 2006), sendo possível apenas utilização da madeira de plantações de pinus para esta finalidade.

Além dos parâmetros técnicos discutidos anteriormente, a escolha e uso da biomassa em projetos de geração de calor e energia recaem sobre outras questões maiores, Zahraee *et al.* (2020) em seu estudo amplo sobre os desafios de planejamento da cadeia de suprimentos de biomassa identificou que as principais barreiras no desenvolvimento de biomassa e biocombustível são os altos custos da matéria-prima, a incerteza na oferta e a demanda de biomassa, a falta de uma regulamentação política e subsídios governamentais, e o preço do petróleo. Os pontos levantados fizeram com que o setor florestal brasileiro direcionasse seus esforços no aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, como aqueles provenientes da indústria de painéis de madeira.

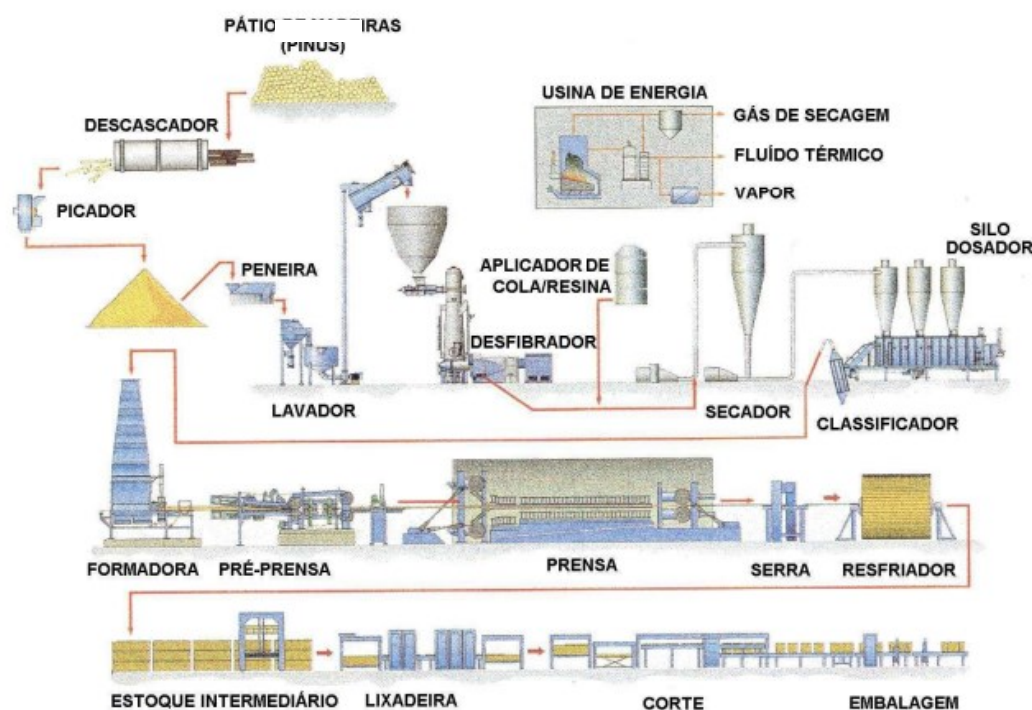
A indústria de painéis de madeira, seus resíduos lignocelulósicos e a cogeração de energia

No Brasil, as indústrias de painéis de madeira reconstituída estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste do país, nos Estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais; já as unidades fabris de painéis laminados estão localizadas nas regiões Sul e Amazônica, onde operam principalmente com toras do gênero *Pinus* spp. e de espécies tropicais (Sanquetta *et al.*, 2020; IBÁ, 2017). Entre os anos da pandemia, 2020 e 2021, os painéis de madeira e os pisos laminados foram os segmentos que mais cresceram no país, em média, 9,5% e 15,2% respectivamente. Particularmente para os painéis de madeira,

95,2% das vendas são de produtos MDF e MDP, representando uma produção de 4,9 e 3,2 de milhões de m³ (IBÁ, 2022).

O processo de produção de painéis de madeira reconstituída inclui uma série de etapas operacionais, que no geral, englobam a manutenção do pátio de madeiras, descascamento, picagem e classificação das toras, desfibramento (processo de MDF – Figura 2) ou produção de cavacos e partículas (processo de MDP – Figura 3), aplicação de cola, mesa formadora, prensagem, corte e lixamento.

Figura 2 – Processo de produção de painéis de fibras de média densidade (MDF, ou *Medium Density Fiberboard*)

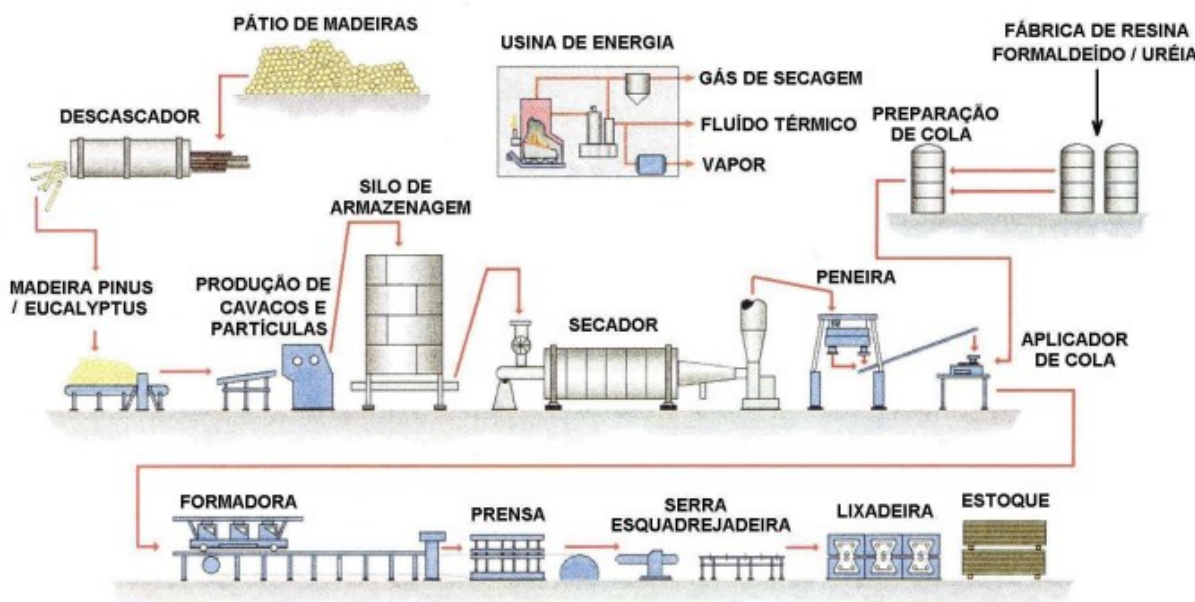


Fonte: Iwakiri (2023a).

Em ambos os processos produtivos são gerados resíduos desde o recebimento e processamento das toras, como as cascas picadas, quanto nas linhas industriais, sejam resíduos fibrosos (advindos do processo de desfibramento no MDF) ou em partículas (advindos do processo de produção de cavacos e partículas do MDP), ou aqueles provenientes do corte e lixamento dos painéis. A gestão e disposição desses resíduos em aterros podem gerar passivos ambientais às empresas, que buscam alternativas para deixar o processo mais sustentável e econômico. Com valores de poder calorífico superior entre 16,8 MJ kg⁻¹ e 19,7 MJ

kg⁻¹, o reaproveitamento energético aparece como uma opção interessante (Farage *et al.*, 2013).

Figura 3 – Processo de produção de painéis de madeira aglomerada (MDP, ou Medium Density Particleboard)



Fonte: Iwakiri (2023b).

Para resíduos industriais, a separação cuidadosa da fonte e a triagem da biomassa (moagem e peneiramento), além de outros processos de pré-tratamento, como lavagem para reduzir o teor de contaminantes ou sujeira, ou peletização e briquetagem para aumentar a densidade do produto, podem servir para melhorar as características dos mesmos para geração de energia, além de diminuir o nível de contaminação de metais pesados (Krook; Mårtensson; Eklund, 2006; Thiffault *et al.*, 2018).

Em busca de instalações industriais com autossuficiência energética, os resíduos de painéis de madeira também podem ser incluídos e complementar, com a devida modificação e aquisição de equipamentos necessários de conversão da biomassa, no processo de cogeração de energia para a produção de eletricidade e energia térmica (calor) com substituição total ou parcial do gás natural, que é tradicionalmente utilizado nestes casos (Oliveira *et al.*, 2014). Ainda de acordo com Oliveira *et al.* (2014), a empresa se beneficia desse investimento de algumas maneiras: i. pela economia na compra de energia elétrica; ii. pela flexibilidade gerencial para escolher a melhor alternativa de uso para dos próprios cavacos de

madeira sejam para a fabricação de painéis de madeira ou para geração e comercialização de energia elétrica; e iii. além da diversificação de suas fontes de receita e incorporação um novo modelo de negócio às suas operações.

Para o funcionamento de uma termoelétrica movida a biomassa é imprescindível o acesso e a disponibilidade da matéria prima, assim como verificado por Preilipper *et al.* (2016), que estudou a viabilidade econômica do uso de resíduos do beneficiamento de madeira nativa na região de Marcelândia, no Estado do Mato Grosso. Além disso, flutuação drástica dos preços da eletricidade derivada da biomassa, a localização e eficiência e custos da planta, tipo de eletricidade substituída e instrumentos de política podem afetar significativamente a viabilidade geral do projeto (Yilmaz *et al.*, 2013; Khatiwada *et al.*, 2016).

A escala de operação de sistemas termelétricos é outro ponto importante a se destacar e que vem ao encontro das principais indústrias de painéis de madeira existentes no Brasil, já que o custo total por unidade de produção de eletricidade diminui significativamente à medida que a capacidade da planta aumenta, isso se utilizado uma tecnologia de conversão eficiente, devido à economia de escala no sistema de produção (Silva, 2016; Colle *et al.*, 2016; Akhtari *et al.*, 2014; Upadhyay *et al.*, 2012). De forma geral, quanto maior a escala ou capacidade de geração do sistema, menor é o custo por eletricidade gerada (MW); as magnitudes dos dois são inversamente proporcionais devido à eficiência de conversão (EC), passando de 30% EC em usinas de até 10 MW e 42% EC em usinas de até 50 MW (Caputo *et al.*, 2005).

Além dos parâmetros técnicos, a análise econômica e as incertezas associadas aos projetos devem ser consideradas para projetar sistemas de conversão de massa em energia (Yilmaz *et al.*, 2013; Colle *et al.*, 2016).

Análise econômica de projetos de geração de energia sob condições de risco

Os conceitos de risco e análise de risco são usados nas mais diversas áreas de atuação humana (como, engenharias e processos industriais, comunicação e informação, transporte, negócios e finanças, biotecnologia, na área médica e de saúde ocupacional, e na agricultura), embora foram estabelecidas como um campo científico apenas nos últimos 40 anos, sendo que seus princípios básicos, teorias e métodos existentes têm se desenvolvido com mais afinco à medida que os sistemas

tecnológicos se tornam mais complexos, sobretudo pelas rápidas transformações técnicas e econômicas que resultam em grandes incertezas e reduzida habilidade de fazer previsões acuradas sobre o futuro (Esperancini, 2006; Benami *et al.*, 2021).

A capacidade de definir o que pode acontecer, avaliar os riscos e incertezas associados e escolher entre alternativas está no centro do sistema de gestão de riscos (Aven, 2012). Como as terminologias e conceitos variam muito, se torna importante sistematizar os conceitos relacionados a risco e incerteza. Em aplicações econômicas, a distinção entre risco e incerteza tem sido feita com base na disponibilidade de informações, que permitam mensurar a probabilidade de ocorrência de eventos futuros (Esperancini, 2006). Em projetos, o risco sistemático (risco de mercado ou risco não diversificável) é inerente aos fatores que afetam o fluxo de caixa que também estão relacionados a outras atividades no mercado como preços de energia, preços de matérias-primas e situações políticas; já o risco não sistemático (risco específico) é reservado somente a uma porção específica do mercado (Aven, 2012).

No setor de energia, a possibilidade de aplicação de métodos matemáticos no apoio à tomada de decisões vem contribuindo para promover o desenvolvimento energético sustentável (Rabe; Streimikiene; Bilan, 2019). No entanto, os investimentos em bioenergia requerem investimentos de longo prazo e sua lucratividade está diretamente relacionada às variações de preços nos mercados de combustíveis e energia, o que pode afetar os resultados econômicos do empreendimento (Tromborg *et al.*, 2011). As decisões de investimento são geralmente referidas como decisões de orçamento de capital ou de dispêndios com ativos fixos, pois a maioria das empresas de grande porte prepara um orçamento anual com os principais projetos aprovados em que haverá investimentos (Brealey; Myers; Marcus, 2019).

Na avaliação de um projeto são aplicados um conjunto de indicadores econômicos, como o valor presente líquido (VPL), a taxa de interna de retorno (TIR) e o payback que auxiliam o gestor comparar diferentes cenários de uma mesma proposta (Motta *et al.*, 2009; Brealey; Myers; Marcus., 2019; Yilmaz *et al.*, 2013). Além disso, levam-se em conta os investimentos em máquinas e equipamentos, bem como as despesas recorrentes de funcionamento da atividade, respectivamente definidas como despesas de capital (capital expenditure, ou CAPEX) e despesas operacionais (operational expenditure, ou OPEX), e ainda mais recentemente; tem

se levantado o custo nivelado de energia (LCOE) ou o custo nivelado de captura de carbono (LCOC) a fim de selecionar processos industriais mais sustentáveis do ponto de vista energético e ambiental (Ashkanani *et al.*, 2021). Nestes últimos parâmetros, divide-se o custo total da indústria, incluindo as despesas de capital e operacionais, pela energia produzida ou carbono capturado ao longo da vida útil estimada da atividade.

Uma análise dos sistemas de geração de calor por biomassa lenhosa no Alasca-EUA, mostrou que indicadores econômico-financeiros como payback e TIR são fortemente influenciados pelo custo da aquisição da biomassa florestal, cujos preços dependem não apenas do mercado, mas também das políticas energéticas governamentais, pode afetar a viabilidade econômica dos investimentos (Nicholls; Brackley; Parrent, 2015). A situação é ainda mais desafiadora no Brasil, já que os preços da biomassa são regionalizados e dinâmicos, muito em função do alto custo de transporte e acessibilidade à floresta (Almeida; Silva; Angelo, 2012). À vista disso, os projetos sobre a cadeia de abastecimento de biomassa devem incluir a incerteza em seus modelos de otimização, o que pouco tem acontecido na maioria dos estudos com a utilização de biomassa (Lo *et al.*, 2021).

Uma forma de estudar os resultados de risco com as variáveis integrantes do processo é utilizar uma abordagem comportamental estatística que utiliza distribuições de probabilidades predeterminadas e valores aleatórios a partir de um histórico ou banco de dados a fim de simular uma série contínua de compensações entre risco e retorno, em vez de uma só estimativa pontual (Gitman, 2008; Brealey; Myers; Marcus, 2019).

Para lidar com o risco no processo de tomada de decisões, algumas empresas usam método de simulação Monte Carlo que permitem modelar as incertezas relacionadas à cadeia de suprimento de biomassa e realizar uma investigação sobre a sensibilidade do modelo que surge dessas incertezas (Höltinger *et al.*, 2014). Somada a evolução computacional dos últimos anos, a análise de sensibilidade, a análise do ponto de equilíbrio e a simulação de Monte Carlo permitem identificar os pressupostos imprescindíveis e explorar o que pode dar errado em diferentes cenários, calculando o efeito da mudança de uma única variável de cada vez (Sugiyama, 2008; Brealey; Myers, 2019). Entre as opções existentes, o método de Monte Carlo pode ser realizado por meio do programa computacional @RISK desenvolvido pela empresa Palisade, que tem interface com

a plataforma Microsoft Excel (Palisade, 2023) e é amplamente adotado em trabalhos acadêmicos (Li; Guiping, 2016; Collares *et al.*, 2020).

O processamento de dados via método de Monte Carlo permite identificar, quais variáveis devem ser priorizadas para implementação de ações visando à melhoria da produtividade; definição de ciclos ótimos, bem como analisar os lucros e riscos de sistemas agrícolas e florestais (Maqhuzu; Yoshikawa; Takahashi, 2017; Gonçalves *et al.*, 2017). Como exemplo, Gonçalves *et al.* (2017) analisaram o efeito da rotação econômica de plantações de eucalipto para produção de celulose em diferentes sítios produtivos sob condições de risco; já Li e Guiping (2016) avaliaram as implicações associadas às incertezas da cadeia de suprimentos sobre o preço mínimo de venda de combustível produzido através da biomassa.

De forma inovadora, além de avaliar os parâmetros técnicos da planta industrial, este trabalho discorrerá sobre as variáveis críticas sob condições de risco, que poderiam inviabilizar o aproveitamento energético dos resíduos lignocelulósicos de uma indústria de painéis de madeira.

CAPÍTULO 1

VIABILIDADE ECONOMICA DA COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOMASSA FLORESTAL EM UMA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA EM SUBSTITUIÇÃO AO GÁS NATURAL¹

Souza, A. G. O.; Barbosa, F. S.; Esperancini, M. S. T.; Guerra, S. P. S.

Faculdade de Ciências Agronômicas
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

RESUMO

A exemplo do uso do bagaço, palha e palha da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica em usinas sucroalcooleiras; recentemente, a recuperação da biomassa florestal vem aumentando na tentativa de reduzir o uso de combustíveis fósseis e aumentar a geração de energia elétrica voltada para a autossuficiência fabril. O potencial de geração de energia nesse segmento é considerável, mas o uso da biomassa em processos de cogeração depende de um retorno atrativo dos investimentos. Este estudo teve como objetivo analisar a viabilidade econômica do investimento em equipamentos de geração de energia térmica e elétrica que viabilizem o aproveitamento de resíduos florestais e cavacos de madeira em substituição à atual geração de energia a gás em uma instalação industrial de painéis de madeira (rota tecnológica 1) ou investimento apenas em equipamentos de geração térmica (rota tecnológica 2). Os resultados mostraram que o investimento para substituir o gás natural por biomassa florestal é economicamente viável não só para a geração de ambos os tipos de energia, mas também para a própria geração de energia térmica. Os altos custos de insumos energéticos como gás natural e eletricidade para a indústria explicam os resultados, apesar da exigência de altos investimentos em sistemas de cogeração.

Palavras-chave: aproveitamento de resíduos; energia renovável; geração térmica; geração de energia;

¹ Capítulo redigido de acordo com as normas do periódico Croatian Journal of Forest Engineering.

Economic Feasibility of Electrical Power Cogeneration from Forestry Biomass in an Engineered Wood Panel Industrial as replacement of natural gas

ABSTRACT

The use of sugarcane bagasse, straw, and chaff for electrical power generation in sugar-ethanol mills has been established; more recently, the recovery of forest biomass has been increasing in an attempt to reduce the use of fossil fuels and to increase electrical power generation focused on self-consumption. The potential for power generation in this segment is considerable, but the use of biomass in cogeneration processes depends on an attractive return on investments. This study was designed to analyze the economic feasibility of investment in thermal and electrical power generation equipment that makes it possible to use forest and logging residues and wood chips to replace the current gas-fired power generation in an engineered wood panel industry facility (technological route 1) or investment only in thermal generation equipment (technological route 2). Results showed that the investment to replace natural gas with forest biomass is economically viable not only for the generation of both types of energy but also for the generation of thermal energy itself. Excessive costs of energy inputs such as natural gas and electricity for the industry explain the results, despite the requirement for high investments in cogeneration systems.

Keywords: residues usage; renewable energy; thermal generation; power generation;

1.1 INTRODUÇÃO

A biomassa lignocelulósica pode ser convertida em uma variedade de produtos químicos e energia, incluindo combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (Londo *et al.*, 2018). Além dos passivos ambientais causados pela geração e disposição de resíduos, também há um passivo econômico, uma vez que o potencial energético da biomassa proveniente de resíduos florestais geralmente é muito elevado e, em geral, não é utilizado. A matriz energética do Brasil utiliza uma das maiores porcentagens de fontes renováveis de energia. Enquanto essa participação é de 13% em média mundial, no Brasil, atingiu 43,5%, em 2016, especialmente para produtos derivados da biomassa da cana-de-açúcar e energia hidráulica (Brasil, 2018). Na matriz elétrica brasileira, o setor sucroalcooleiro tornou-se pioneiro no uso de bagaço e palha da cana-de-açúcar para gerar energia elétrica com a finalidade de consumo próprio e venda para distribuidores. Devido ao volume produzido, o bagaço brasileiro (palha triturada da cana-de-açúcar) está sendo amplamente utilizado na geração de energia elétrica. Com a intensificação do volume de produção, recursos pouco

utilizados até recentemente, como a palha da cana-de-açúcar, também estão sendo amplamente utilizados para a produção de eletricidade, como também outros setores mostraram evolução na transformação de resíduos em fontes de energia renováveis (Santos, 2018).

O setor florestal possui excelente potencial para utilização de resíduos de biomassa. A indústria de base florestal no Brasil (papel e celulose, madeira e indústria moveleira) inclui 95 usinas movidas a biomassa, produzindo aproximadamente 3,1 GW, correspondendo a uma participação de 7,6% na matriz elétrica nacional (ANEEL, [2017]). Um dos resíduos utilizados para a produção de bioenergia no setor florestal é o licor negro, resíduo da produção de papel e celulose (1,9 GW); caracteriza-se como a segunda fonte de biomassa mais importante (14,94%) e ocupa apenas uma posição abaixo do bagaço da cana-de-açúcar (Pedroso *et al.* 2018). Ainda assim, os resíduos florestais são usados para geração de energia por meio da queima em caldeiras (63,2%), e 29,4% estão sendo reutilizados como matéria-prima por outras empresas (IBÁ, 2019). Em média, a indústria brasileira de processamento de madeira tem baixo aproveitamento de resíduos potencialmente energéticos. Aproximadamente, 40% desses resíduos são utilizados e o restante é descartado (Brand, 2010). Nesse contexto, estima-se que a produção de resíduos florestais no Brasil seja da ordem de 17 milhões de metros cúbicos por ano (FAO, [ca. 2019]).

À medida que os custos de energia aumentam, as indústrias têm buscado o uso de resíduos industriais e florestais como fonte alternativa de energia. No entanto, o aumento do uso de biomassa depende da viabilidade econômica de investimentos para a conversão de biomassa em energia, sendo essencial o conhecimento da composição do material, valor calorífico, teor de umidade e densidade básica. (Eufrade-Junior *et al.* 2018). Essas propriedades estão fortemente relacionadas a uma melhor opção de aproveitamento energético e sua viabilidade econômica, no uso de biomassa florestal para geração de calor e eletricidade, impactando diretamente os custos de manuseio, transporte e sistemas de conversão de energia (Akhtari; Sowlati; Day, 2014; Sosa *et al.*, 2015; Eufrade-Junior *et al.*, 2017).

Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade econômica de um projeto de investimento em duas rotas tecnológicas, nos quais utiliza resíduos florestais, rejeitos de processamento de madeira e cavacos de madeira que são produzidos em

uma indústria de painéis de madeira. A primeira rota tecnológica considerou o investimento para substituir o consumo de gás natural e a cogeração de 5,4 MW de energia elétrica; a segunda rota tecnológica considerou apenas o investimento para o equipamento gerador de energia térmica para substituir o gás natural.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

1.2.1 Objeto de estudo

A empresa, fabricante de painéis de madeira, está localizada no interior de São Paulo. É uma organização de grande porte que opera com capacidade produtiva de 700.000 m³ por ano de painéis de madeira. Atualmente, a empresa possui um sistema interno de geração de energia (somente energia térmica e não elétrica) que atende parcialmente suas necessidades, ou seja, adquire parte da energia necessária do mercado, consumindo 2,4 m³ h⁻¹ de gás natural e 2.000 kg h⁻¹ de biomassa externa para manter o processo de fabricação de chapas em uma de suas linhas.

O projeto de investimento em estudo tem como objetivo analisar a viabilidade econômica do investimento em equipamentos de geração de energia térmica e elétrica que possibilitem o uso de resíduos florestais e de madeira, como sobras de serraria e cavacos, para substituir a geração atual de energia a gás em uma indústria de painéis de madeira (rota tecnológica 1), ou investimento apenas em equipamentos de geração de energia térmica (rota tecnológica 2). Como este é um estudo de caso, os dados utilizados para a execução do estudo são provenientes de fontes primárias derivadas da gestão e das informações técnicas da própria empresa. De acordo com a implementação proposta do projeto, o fluxo de biomassa deve aumentar de 2.000 kg h⁻¹ para 18.200 kg h⁻¹, mantendo assim o sistema de produção de energia em equilíbrio. A biomassa adicional será disponibilizada pela própria empresa, uma vez que as operações florestais e o sistema de processamento de chapas produzem um excedente desse material. Quando houver deficiência na quantidade de biomassa disponível no processo de fabricação, o déficit será suprido por cavacos de madeira desviados do próprio processo de produção de chapas.

1.2.2 Metodologia

Nesse tipo de empreendimento de larga escala, a tomada de decisão que envolvem valores consideráveis de recursos é intrínseca. Em regra, tais recursos são escassos, e otimizar a escolha de futuros investimentos economicamente vantajosos é necessário, considerando que os lucros líquidos futuros devem superar as despesas incorridas no presente. No sistema atual, as câmaras de combustão consomem exclusivamente gás natural, em que se assume um consumo de 2400 kg h^{-1} . Nessas condições, o consumo de biomassa florestal se restringe apenas à uma caldeira do sistema, o que implica o uso de apenas 2000 kg h^{-1} . Na proposta de implementação do gerador, o sistema inclui a instalação de uma caldeira que possa ser usada para queimar tanto biomassa residual do processo quanto florestal. Assim, o consumo de biomassa aumentaria de 2000 kg h^{-1} para 18200 kg h^{-1} (biomassa que estaria prontamente disponível na forma de cavacos, devido ao excedente de produção), e haveria uma interrupção imediata do consumo de gás natural, disponibilizando a geração de 5,4 MW de eletricidade para venda à rede elétrica ou para consumo próprio da empresa (rota tecnológica 1).

Na rota tecnológica 2, considerou-se apenas a substituição do consumo de gás natural. Várias etapas do processo de produção de chapas de madeira podem gerar resíduos de madeira e esses resíduos destinados à queima e geração de energia térmica e vapor. Neste estudo, foram considerados, para o cálculo, os valores de poder calorífico inferior (PCI) apresentados pela empresa de painéis de madeira, e os efeitos de conversão foram os seguintes: casca de eucalipto ($7,2 \text{ MJ kg}^{-1}$), eucalipto ($8,9 \text{ MJ kg}^{-1}$), óleo BPF ($40,3 \text{ MJ kg}^{-1}$) e gás natural ($45,4 \text{ MJ kg}^{-1}$). Para a densidade da madeira, considerou-se 450 kg m^{-3} . Os itens mais caros estão relacionados à aquisição de equipamentos e sua montagem. Os equipamentos são importados e seu custo pode aumentar em função das taxas de câmbio e das importações. O cronograma de implementação do projeto é de 14 meses após a liberação dos recursos financeiros. O tempo de fabricação e montagem dos equipamentos está incluído neste período.

1.2.3 Investimentos iniciais

Na análise de investimento, é necessário orçar os investimentos iniciais, os custos de funcionamento do sistema, e as receitas do empreendimento.

Com base no orçamento de capital, é possível estimar o fluxo de caixa descontado (FCD) e os indicadores de viabilidade econômica, como se mostra a seguir. Os investimentos necessários para as modificações serão de R\$ 75 milhões para a rota 01 e R\$ 35 milhões de reais para a rota 02. Para um investimento deste porte, as empresas brasileiras optam, geralmente, por captar recursos do Banco de Desenvolvimento Brasileiro (BNDES), que oferece modalidades específicas para a utilização de energia renovável e taxas de juro mais baixas do que as cobradas pelo mercado financeiro. Neste estudo, a possibilidade de financiamento ou incentivos fiscais não foram estudadas. A Tabela 1.1 mostra os investimentos necessários para a modificação do atual sistema e a utilização do sistema com aproveitamento de resíduos de madeira.

O equipamento atualmente instalado tem uma capacidade térmica de 110 MJ s^{-1} , distribuída como: grelhas (42 MJ s^{-1}), suspensão (17 MJ s^{-1}) e gás (51 MJ s^{-1}). Com uma produção de 700000 m^3 por ano de produtos, o sistema de produção tem um consumo médio de energia de 85 MJ s^{-1} . No processo, o consumo de energia é distribuído em: 29 MJ s^{-1} na forma de vapor, $44,8 \text{ MJ s}^{-1}$ na forma de gás quente e $10,2 \text{ MJ s}^{-1}$ na forma de aquecimento de óleo térmico. Vale ressaltar que tal consumo caracteriza-se como estimado já que o consumo real pode variar de acordo com a temperatura externa, umidade dos materiais consumidos e o produto a ser produzido, consumindo mais ou menos energia por unidade do produto acabado.

Tabela 1 – Investimento inicial para ambas as rotas tecnológicas

Descrição	Rota 01	Rota 02
	Valor, R\$	Valor, R\$
Detalhe do projeto	250.000	161.700
Caldeira de biomassa	45.800.000	29.056.500
Gerador de energia elétrica	11.700.000	–
Montagem de equipamentos eletromecânicos	9.000.000	2.871.000
Obras civis	4.500.000	1.287.000
Documentação e licença	250.000	105.600
Contingência, 5%	3.500.000	1.650.000
Total	75.000.000	35.131.800

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

Os resíduos e o pó de madeira que compõem a biomassa utilizada na cogeração são gerados em vários pontos do processo de produção. Esses materiais, que têm características diferentes, incluem madeira na forma de fibras, serragem, pó de lixas e resíduos de chapas em diferentes tamanhos. Cada um desses materiais tem características de queima específicas e teor de umidade específico (Souza *et al.*, 2012). Para o aumento do consumo de biomassa e a cogeração de energia elétrica, é necessário adquirir novos equipamentos que substituirão o sistema atualmente utilizado para produção de gás quente e aquecimento de óleo térmico. Esse equipamento consiste, principalmente, de uma caldeira para queima de biomassa e um gerador de energia elétrica. Além disso, outros custos relacionados aos detalhes do projeto, montagem eletromecânica dos equipamentos, obras civis, licenças e remunerações foram previstos na fase inicial de investimento. Nessa fase, é prevista, também, uma contingência de 5% do valor do investimento inicial para cobrir possíveis riscos relacionados à implementação do investimento. O investimento no novo sistema prevê um dimensionamento do gerador de energia elétrica de 5,4 MW, e o consumo de vapor do processo de fabricação de chapas exige 29,2 MJ; portanto, faz-se necessário que o equipamento gerador de energia tenha uma saída de vapor que possa atender à demanda do processo de produção.

1.2.4 Custos Operacionais do Sistema

Os custos relacionados a salários, materiais, atividades terceirizadas, operações e outros itens foram considerados para operacionalizar o sistema. Os custos operacionais do sistema atual referem-se às equipes que trabalharão no setor, aos novos técnicos que precisarão ser contratados para operar o novo equipamento e os encargos relacionadas aos trabalhadores da operação. O custo dos materiais refere-se a itens de consumo direto ou indireto que serão utilizados diretamente na geração de vapor após a implementação do gerador. Em relação à geração de vapor e resfriamento do sistema, foram considerados os custos dos produtos químicos usados para tratar a água, os óleos e as graxas utilizados para lubrificar os equipamentos e as peças sobressalentes para substituir aquelas com maior desgaste, como válvulas de controle, válvulas manuais, rolamentos e combustíveis. Em relação às atividades terceirizadas exigidas pelo projeto, estão incluídos os prestadores de serviços nas áreas de manutenção mecânica, elétrica e civil, movimentação de cargas em geral, despesas gerais associadas à obtenção de licenças ambientais, certificações e seguros e consultores técnicos. Os custos operacionais também foram considerados. Estes são os custos relacionados ao aluguel de equipamentos, disposição de resíduos, coleta e disposição da cinza gerada no processo de queima de biomassa. Incluem-se, também, treinamento profissional, despesas relacionadas à tecnologia da informação, material de escritório e comunicação interna e externa.

1.2.5 Renda Adicional do Projeto

Os benefícios considerados são os ganhos monetários relacionados à economia de custos com a aquisição de gás natural e eletricidade, após deduzir os custos adicionais com a biomassa e operacionais. A quantidade de gás natural adquirida em um ano de operação no sistema atual foi usada para estimar a economia de custos, sendo precificada com base na média móvel do estoque em agosto de 2017. Da mesma forma, a quantidade de eletricidade adquirida em um ano foi estimada e precificada com base em seu valor de mercado aberto em agosto de 2017. Oscilações possíveis nos preços de mercado do gás natural e da eletricidade não foram consideradas e as despesas com a aquisição de biomassa necessária para substituir o gás natural neste processo foram deduzidas dos ganhos

estimados. O processamento de madeira inclui o custo do transporte de frete do campo para a unidade de processamento, pagamento de funcionários, materiais, depreciação de máquinas, ferramentas diretas e outros custos relacionados ao processo. O aumento no custo operacional do novo sistema de queimador de biomassa é 5% em relação ao custo operacional total do sistema atual. Alguns dos operadores atuais devem ser realocados para atender às demandas da nova operação. O aumento de custo é devido à necessidade de contratação de especialistas em conexão com o novo sistema de geração de energia elétrica e manutenção.

1.2.6 Horizonte de Planejamento, Taxa Mínima de Retorno Aceitável (TMA) e Indicadores de Viabilidade Econômica

Considerou-se um horizonte de planejamento de 20 anos, pois esse é o tempo de vida esperado do gerador, e foi assumida pelos acionistas da empresa uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 13,5%. Essa taxa caracteriza-se como, relativamente, alta em relação às taxas de juros de mercado, mas considerando os fluxos de caixa livres de risco, foi decidido incluir uma TMA mais alta que incorporaria todos os riscos do projeto. Os seguintes indicadores de viabilidade econômica foram analisados: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* econômico (PBE).

1.2.7 Valor Presente Líquido (VPL)

Através da representação das características relevantes do projeto com base no mesmo denominador comum, ou seja, fluxo de caixa, o cálculo do VPL permite avaliar a viabilidade de investimentos e estimar o valor a ser gerado para o acionista (Brealey; Myers; Marcus; 2019). O VPL do projeto de investimento é a soma dos valores presentes de cada um dos fluxos de caixa, tanto positivos quanto negativos, que ocorrem ao longo da vida do projeto. A determinação geral para o método do VPL é dada pela Equação (1).

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} - CF_0 \quad (1)$$

Em que,

CF_j valores de entrada ou saída de caixa em cada período

CF_0 valor de investimento inicial

j período em anos

i taxa de desconto do projeto

A regra para tomar decisões sobre o VPL para projetos independentes é adotar projetos de investimento com valores de VPL positivos como viáveis.

1.2.8 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR corresponde à taxa de desconto que zera o VPL de um projeto (Calôba, Neves; 2008). Tipicamente, o fluxo de caixa inicial é representado pelo valor do investimento. Os outros fluxos de caixa indicam os montantes de receita ou despesa devidos. A TIR pode ser vista como a taxa de retorno capitalizado anual que a empresa obterá se investir no projeto e receber o fluxo de caixa esperado (Gitman; 2010). A taxa interna de retorno (TIR) é dada pela Equação (2).

$$TIR = i \left| \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} - CF_0 \right| \quad (2)$$

Em que,

CF_j valores de entrada ou saída de caixa em cada período

CF_0 valor de investimento inicial

j período em anos

i taxa de desconto do projeto

Considerando que os valores em dinheiro ocorrem em momentos diferentes, é possível concluir que o método TIR, ao levar em conta o dinheiro ao longo do tempo, na verdade, expressa a rentabilidade se for uma aplicação, e custo no caso do financiamento do fluxo de caixa (Assaf Neto, 2001). Por essa razão, para ser economicamente viável, a TIR de um projeto de investimento deve superar o retorno mínimo esperado pelo investidor, que é dado pela TMA.

1.2.9 Payback Econômico (PB)

O *payback* econômico é o tempo de reembolso do investimento ou empréstimo, ou seja, o número de períodos necessários para recuperar o

investimento ou o tempo necessário para que o investimento elimine seu fluxo acumulado (Calôba, Neves; 2008). O *payback* econômico (PB) é descrito pela Equação (3).

$$PB = n \left| \sum_{j=0}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} \right| = 0 \quad (3)$$

Em que,

CF_j valores de entrada ou saída de caixa em cada período

j período em anos

i taxa de desconto do projeto

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Fluxo Energético

Conforme descrito anteriormente, o novo sistema prevê a substituição do sistema atual por um sistema de caldeira e gerador capaz de gerar vapor saturado a uma pressão de 85 MPa. Foram quantificados, também, os fluxos em massa e a potência da biomassa residual proveniente do processamento da madeira (Tabela 1.2).

Tabela 2 – Fluxo energético – Rotas tecnológicas

Descrição		Rota Atual	Rota 01	Rota 02
Entrada				
Biomassa interna	MW	31,1	31,1	31,1
Pó de Serra	MW	20,0	20,0	20,0
Biomassa externa	MW	9,3	44,8	34,6
Gás natural	MW	25,3	0,0	0,0
Saída				
Vapor	MW	29,2	29,2	29,2
Óleo térmico	MW	10,2	10,2	10,2
Gás quente	MW	44,8	44,8	44,8
Energia Elétrica	MW	0,0	5,4	0,0
Eficiência de conversão	%		53	95

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

1.3.2 Custos Operacionais Adicionais

Para o processo de fabricação de chapas, não há aumento nos custos operacionais do novo equipamento, embora, nos processos auxiliares de operação da caldeira e manutenção de ativos, sejam previstos custos operacionais de cerca de R\$ 2,7 milhões por ano. Os custos operacionais do novo processo estão alinhados com os custos de produção atuais. Os aumentos serão insignificantes em relação à operação total, pois o setor possui uma equipe estruturada que será transferida para o sistema com geradores de energia; o aumento no custo operacional ocorrerá por meio da contratação de engenheiros especializados (Tabela 1.3).

Os custos operacionais adicionais equivalem a 3,6% do valor total do investimento. O valor estimado para o item de operações e manutenção de ativos (O&M) é de 5% do valor total do investimento (Tomalsquim, 2016).

Tabela 3 – Despesas operacionais adicionais em ambas as rotas tecnológicas

Descrição dos custos operacionais	Rota 1	Rota 2
	Valores anuais	Valores anuais
	R\$	R\$
Salários e encargos	926.000	476.000
Materiais gerais	893.000	481.000
Atividades terceirizadas	650.000	476.000
Operação	207.000	80.000
Outros	24.000	22.000
Custos totais	2.700.000	1.535.000

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

1.3.3 Renda Adicional do Projeto

A Tabela 1.4 mostra os benefícios econômicos previstos no projeto devido as economias de custos com gás natural e eletricidade, descontando o valor do consumo adicional de biomassa necessária para o desempenho do equipamento, bem como o aumento nos custos associados à operação e manutenção do sistema. Os resultados indicam um benefício monetário anual de R\$ 15,02 milhões de reais por ano na rota tecnológica 1 e R\$ 8,11 milhões de reais na rota tecnológica 2.

Tabela 4 – Análise de custo/benefício dos projetos, incluindo custos adicionais

	Rota 1	Rota 2
Ganhos do projeto	milhões R\$ ano ⁻¹	milhões R\$ ano ⁻¹
Economia com gás natural	20,98	20,98
Economia com eletricidade	10,95	-10,95
Custo adicional com biomassa	-14,21	-6,25
Custo adicional com mão de obra	-2,70	-1,54
Vendas de biomassa	0	5,86
Ganhos totais	15,02	8,11

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

1.3.4 Fluxo de Caixa, Fluxo de Caixa Descontado, Horizonte de Planejamento, Taxa Mínima de Retorno Aceitável e Indicadores de Viabilidade Econômica

Com base nos dados dos investimentos, os custos e despesas para operação dos sistemas e os benefícios econômicos de se investir em ambas as rotas tecnológicas, bem como os dados de fluxo de caixa e fluxo de caixa descontado, usando uma taxa de desconto de 13,5%, estão descritos na Tabela 1.5.

Tabela 5 – Fluxo de caixa e Fluxo de caixa descontado

Período (anos)	Rota 1	Rota 2
	Fluxo de caixa descontado	Fluxo de caixa descontado
	R\$	R\$
0	-75.000.000	-35.131.800
1	13.232.153	7.146.918
2	11.658.284	6.296.844
3	10.271.616	5.547.880
4	9.049.882	4.888.000
5	7.973.464	4.306.608
6	7.025.079	3.794.368
7	6.189.497	3.343.056
8	5.453.301	2.945.424
9	4.804.671	2.595.087
10	4.233.190	2.286.420
11	3.729.683	2.014.467
12	3.286.064	1.774.861
13	2.895.211	1.563.754
14	2.550.846	1.377.757
15	2.247.442	1.213.883
16	1.980.125	1.069.500
17	1.744.603	942.291
18	1.537.096	830.212
19	1.354.269	731.465
20	1.193.189	644.462

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

A partir dos fluxos de caixa descontados, foram obtidos os indicadores de viabilidade econômica conforme apresentados na Tabela 1.6.

Tabela 6 – Indicadores e análise de viabilidade do projeto

Parâmetros e indicadores	Rota 1	Rota 2
Investimento Inicial, R\$	75.000.000	35.132.150
Duração do projeto, anos	20	20
Valor presente líquido, R\$	27.409.666	20.181.108
Taxa interna de retorno, %	19,45	22,71
<i>Payback</i> econômico, anos	9	7

Fonte: Dados de Pesquisa (2021).

Foi constatado que o investimento é viável com base em ambos os planos de investimento que preveem o retorno do investimento inicial em poucos anos, um Valor Presente Líquido (VPL) positivo e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Usando a TIR, um indicador que não depende da TMA, parece que a produção de energia térmica isoladamente é economicamente mais viável do que o investimento com a inclusão da geração de eletricidade no sistema. O VPL para a produção de energia térmica isoladamente será maior do que o VPL da rota tecnológica 1 quando a $TMA > 16,5\%$, que é a Taxa de Fisher.

1.4 DISCUSSÃO

Os resultados mostram que a utilização de biomassa para produção de energia térmica e/ou elétrica, embora exija um alto investimento inicial, é economicamente viável, conforme indicado pelos critérios financeiros de VPL positivo e $TIR > TMA$ para ambas as rotas tecnológicas. O retorno sobre o investimento inicial ocorre em um período mais curto do que o horizonte de tempo do projeto em ambas as rotas tecnológicas. Deve-se notar que a TMA usada neste estudo é maior do que a taxa básica de juros da economia brasileira (6,5% ao ano), o que é explicado pelos riscos envolvidos nesses projetos de investimento, especialmente em relação aos preços dos insumos de energia. Mesmo com essa

alta margem de TMA, que foi escolhida para incorporar riscos de investimento, o projeto é economicamente viável. Projetos para converter o uso de gás natural para o uso de biomassa florestal são economicamente viáveis devido aos altos custos de insumos de energia.

Uma parte essencial do gás natural utilizado na indústria brasileira vem da Bolívia, sujeito a mudanças e aumentos inesperados de preços quando o governo desse país nacionalizou as plantas produtoras. No caso da rota tecnológica 1, em que energia térmica e elétrica é produzida, o benefício das economias no uso de energia elétrica é alto, devido ao aumento e reajuste das tarifas necessárias para reequilibrar o setor elétrico brasileiro ao final da política de controle tarifário. Outra razão para esse resultado é a economia de escala do sistema (Upadhyay, *et al.* 2012; Silva, 2016).

À medida que a capacidade do sistema aumenta, há um aumento na eficiência de conversão, mas, ao mesmo tempo, há um aumento no custo de capital por unidade de energia produzida, dada a existência de custos mais altos para a aquisição e transporte de biomassa (Akhtari; Sowlati; Day, 2014).

Neste projeto de investimento, os custos de aquisição e transporte de biomassa florestal não são semelhantes, pois há utilização das sobras da produção de chapas de fibras de madeira. Estudos indicam que quanto maior a escala do sistema, menor é o custo de eletricidade gerada (MW); as magnitudes das duas são inversamente proporcionais devido à eficiência de conversão (EC), indo de 30% de EC em uma planta de 10 MW até 42% de EC em uma planta de 50 MW (Caputo *et al.*, 2005).

Embora com capacidade de produção semelhante a este estudo, um projeto de investimento de uso de resíduos florestais da indústria madeireira (restos e aparas, resíduos e lascas de madeira, resíduos de madeira torneada e resíduos de chapas) para geração de energia térmica por combustão no município de Marcelândia (Mato Grosso-MT) apresentou VPL muito menor do que o obtido neste estudo (Preilipper *et al.*, 2016).

Os resultados econômico-financeiros mostram um VPL de R\$ 1,5 milhões para produção de energia elétrica de 5 MW.

Embora a capacidade de produção de eletricidade seja semelhante à considerada neste estudo, o projeto de Marcelândia foi quase totalmente financiado,

resultando em um grande fluxo de caixa na forma de pagamentos de juros a taxas próximas à TMA do projeto.

Comparando os resultados desses investimentos com uma escala menor (1 MW), também altamente financiada em uma indústria moveleira de madeira que gera resíduos como cavaco e serragem que são utilizados como matéria-prima para geração de energia, o projeto não se mostrou viável do ponto de vista econômico, com VPL negativo e baixa TIR (Colle *et al.*, 2016). Verifica-se que, neste caso, o custo do financiamento também foi elevado em detrimento a outros custos e às receitas obtidas. Embora no Brasil sejam escassos os estudos sobre a viabilidade econômica do uso de resíduos e biomassa florestal para geração de energia térmica ou elétrica, a escala e o custo de capital parecem influenciar a viabilidade econômica desse tipo de investimento.

Outro fator que pode explicar a viabilidade econômica do sistema é o tipo de biomassa utilizada. Analisar os valores caloríficos de resíduos da indústria moveleira, incluindo uma mistura de painéis de MDF (fibras de média densidade), aglomerados e compensados com e sem revestimento, resíduos sólidos de madeira, resíduos do processo de produção de MDF, resíduos mistos de painéis de MDF e pó fino de lixamento, esses materiais possuem valores caloríficos que variam de 16,8 MJ kg⁻¹ a 19,74 MJ kg⁻¹ e, em geral, baixo teor de cinzas (Farage *et al.*, 2013). Esses valores caloríficos e o baixo teor de cinzas implicam em melhor qualidade de queima e, conseqüentemente, maior eficiência dos equipamentos, justificando o reaproveitamento dos resíduos.

No entanto, os investimentos em bioenergia requerem investimentos de longo prazo e sua rentabilidade está diretamente relacionada às variações de preços nos mercados de combustíveis e energia, o que pode afetar os resultados econômicos do empreendimento (Tromborg *et al.*, 2011). Uma análise dos sistemas de geração de calor de biomassa lenhosa mostra que indicadores econômico-financeiros como *payback* e TIR são fortemente influenciados pelo custo da biomassa florestal (Nicholls; Brackley; Parrent, 2015). Ambos os estudos visam substituir o gás natural e os recursos não renováveis, cujos preços dependem não só do mercado, mas também das políticas públicas de governo, o que, segundo o autor, pode afetar a viabilidade econômica dos investimentos.

1.5 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o projeto aqui descrito é viável de acordo com a análise do VPL, que apresentou resultado positivo, assim como os resultados da TIR, que foram superiores à TMA. Além disso, verificou-se que o PB é menor que a duração do projeto. A viabilidade econômica foi verificada em ambas as rotas tecnológicas de substituição do gás natural por biomassa florestal, tanto para geração térmica e como na rota de geração térmica e elétrica. Além disso, a viabilidade econômica do projeto é afetada por flutuações nos preços de eletricidade e gás natural; seus benefícios estão condicionados a esses custos de insumos e ao custo de oportunidade da biomassa. Ademais, essas oscilações obrigam o investidor a adotar um TMA muito superior às taxas de juros praticadas no mercado.

REFERÊNCIAS

- AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 117-127, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.058>.
- ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais: dezembro 2017**. [Brasília, DF]: ANEEL, [2017]. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+4º+trimestre+2017/44ee3035-27e5-0398-e7e3-c612ec4dc994>. Acesso em: 09 abr. 2019.
- ASSAF NETO, A. **Estrutura e análise de balanços: um enfoque econômico-financeiro**. 6ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa energética. **Balanco Energético Nacional 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. p. 13-42. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 10 abr. 2019
- BREALEY, R.; MYERS, S. **Fundamentos de Finanças Corporativas**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2019.

CALÔBA, G. M.; NEVES, C. **Engenharia Econômica e Finanças**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

CAPUTO, A. C.; PALUMBO, M.; PELAGAGGE, P. M.; SCACCHIA, F. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 1, p. 35-51, jan. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009>.

COLLE, D. A. T, ZUCCHI, C.; CASAROTTO, G.; SEHNEM, S. Viabilidade de implantação de uma caldeira para cogeração de energia a partir da biomassa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 60, 12 maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v5e1201660-91>.

EUFRATE JUNIOR, H.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. **Industrial Crops And Products**, v. 108, p. 636-640, dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.025>

EUFRATE-JUNIOR, H.; GUERRA, S. P. S.; SANSÍGOLO, C. A.; BALLARIN, A. W. Management of Eucalyptus short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. **Renewable Energy**, v. 121, p. 309-314, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.033>.

FAO. **FAOSTAT**. Roma: FAO, [ca. 2019]. Base de dados. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 20 mar. 2019.

FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá - MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/198050988454>.

GITMAN, L. J. **Princípios da Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education, 2010.

IBÁ. **Relatório 2019**. São Paulo: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2019-final.pdf>. Acesso em: 29 maio 2020.

LONDO, M.; VAN STRALEN, J.; USLU, A.; MOZAFFARIAN, H.; KRAAN, C. Lignocellulosic biomass for chemicals and energy: an integrated assessment of future eu market sizes, feedstock availability impacts, synergy and competition effects, and path dependencies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 12, n. 6, p. 1065-1081, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1926>.

NICHOLLS, D. L.; BRACKLEY, A. M.; PARRENT, D. J. **Economic and environmental benefits of community-scale cordwood hydronic heaters in Alaska-three case studies**. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2015. 22 p. General technical report, PNW-GTR-924. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-924>.

PEDROSO, L. L. A.; SILVA, F. F.; MELO, Á. M.; JUNIOR, M. E.; SHIMOYA, A.; MATIAS, Í. O.; SOUZA, C. L. M. Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo / Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, p. 1980-1996, 2018.

PREILIPPER, U. E. M.; DALFOVO, W. C. T.; ZAPPAROLI, I. D.; MAROUBO, L. A.; MAINARDES, E. L. Aproveitamento do resíduo madeireiro na produção de energia termoeletrica no município de Marcelândia-MT. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36, p. 411-428, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v36i0.39802>.

SANTOS, A. M. **Caracterização química da biomassa: potencial da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração**. 2018. 63f. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

SILVA, A. C. M. R. **Correlações de eficiência energética em função da potência de termelétricas a biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338-351, jan. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.018>.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de pinus taeda. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i2.26593>.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia Termelétrica**: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear.[Rio de Janeiro]: EPE, 2016. 417 p.

TRØMBORG, E.; HAVSKJOLD, M.; LISLEBØ, O.; RØRSTAD, P. K. Projecting demand and supply of forest biomass for heating in Norway. **Energy Policy**, v. 39, n. 11, p. 7049-7058, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.009>.

UPADHYAY, T. P.; SHAHI, C.; LEITCH, M.; PULKKI, R. Economic feasibility of biomass gasification for power generation in three selected communities of northwestern Ontario, Canada. **Energy Policy**, v. 44, p. 235-244, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.047>.

CAPÍTULO 2

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA BIOMASSA RESIDUAL DENSIFICADA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

Souza, A. G. O.; Eufrade-Junior, H.J.; Guerra, S. P. S.; Esperancini, M. S. T.

Faculdade de Ciências Agrônomicas
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Avenida Universitária 3780, Botucatu – SP

RESUMO

O processo de produção de painéis de madeira reconstituída inclui uma série de etapas operacionais, sendo gerada uma quantidade expressiva de resíduos lignocelulósicos, que são rotineiramente descartados em aterros. Com advento da biorrefinaria e a integração de processos industriais, este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade técnico-econômica na utilização destes resíduos lignocelulósicos densificados como fonte alternativa para suprir parcialmente a demanda de cavacos de madeira para geração térmica em caldeiras industriais. Para isso, houve a caracterização química da biomassa residual e o levantamento dos custos de produção e transporte de briquetes, seguido da análise econômica da nova rota tecnológica sob condições de risco. Os resultados encontrados mostraram que os briquetes dos resíduos das indústrias de painéis possuíam o dobro de densidade energética quando comparada aos cavacos de madeira e poderiam ser utilizados para aumentar a eficiência e sustentabilidade do sistema. Além disso, o processo de briquetagem favoreceu o transporte dos materiais em longas distâncias. Em termos econômicos, o investimento na usina de briquetagem teve um *payback* de 2 anos, alta taxa interna de retorno e baixo risco de investimento, sobretudo pelo aumento dos preços dos cavacos de madeira no mercado brasileiro.

Palavras-chave: painéis de madeira; cascas; poder calorífico; método de Monte Carlo;

Technical and economic feasibility of densified residual biomass from the wood panels industry for thermal energy generation

ABSTRACT

The reconstituted wood panel production process includes a series of operational steps, generating a significant amount of lignocellulosic waste routinely discarded in landfills. With the advent of biorefineries and the integration of industrial processes, this work aimed to investigate the technical-economic feasibility of using these densified lignocellulosic residues as an alternative source to partially supply the demand for wood chips for thermal generation in industrial boilers. For this, there was

the chemical characterization of the residual biomass and the survey of the costs of production and transport of briquettes, followed by the economic analysis of the new technological route under risky conditions. The results showed that the briquettes from waste from panel industries had twice the energy density compared to wood chips and could be used to increase the efficiency and sustainability of the system. In addition, the briquetting process favored transporting materials over long distances. In economic terms, the investment in the briquetting plant had a payback of 2 years, a high internal rate of return, and low investment risk, mainly due to increased wood chip prices in the Brazilian market.

Keywords: wood panels; bark; calorific value; Monte Carlo method;

2.1 INTRODUÇÃO

A biomassa florestal vem ganhando espaço nas últimas décadas, como alternativa renovável na geração de energia térmica, mecânica e elétrica (Londo *et al.*, 2018), contribuindo para redução das emissões de gases causadores do efeito estufa (Shukla *et al.*, 2022). Os diferentes segmentos da indústria de base florestal têm integrado soluções tecnológicas para aproveitamento dos seus resíduos lignocelulósicos para propósitos energéticos (ANEEL, 2023). Particularmente para as indústrias de painéis de madeira são poucas as informações sobre os resíduos gerados nos processos produtivos e seu potencial energético de uso.

O processo de produção de painéis de madeira reconstituída inclui uma série de etapas operacionais, como o descascamento, picagem e classificação das toras, desfibramento (processo produtivo para obtenção de painéis MDF – *Medium Density Fiberboard*) ou produção de partículas (processo produtivo do MDP – *Medium Density Particleboard*), aplicação de cola, mesa formadora dos painéis, prensagem, corte e lixamento. Neste caso, uma quantidade expressiva de resíduos é gerada tanto no recebimento e processamento primário da madeira no pátio (excedente de cascas picadas), quanto no processo industrial (Farage *et al.*, 2013). Estes resíduos geralmente são dispostos em aterros e se tornam passivos ambientais às fontes geradoras, que buscam alternativas para deixar o processo mais sustentável e econômico (Thiffault *et al.*, 2023).

Para atender a geração de energia térmica nas instalações industriais de painéis de madeira no Brasil, tradicionalmente são utilizados os cavacos de madeira provenientes de plantações do gênero *Eucalyptus* spp. que são oriundos do mercado local (compra) ou retirados do próprio processo de fabricação dos painéis. Na gestão de instalações industriais, o abastecimento deve garantir o volume

mínimo de biomassa adequado para alimentação do gerador não deixando de lado a qualidade do material que está sendo utilizado. Como combustível sólido, espera-se que a biomassa seja mais homogênea possível, apresente valores caloríficos adequados e baixo teor de cinzas (contaminantes), o que são características encontradas em cavacos de madeira (Oberberger; Brunner; Bärthaler, 2006; Eufrade-Junior *et al.*, 2017; Thiffault *et al.*, 2023).

Ainda por questões tecnológicas, os equipamentos existentes na maioria das instalações industriais de painéis de madeira ainda possuem limitações para a queima de resíduos lignocelulósicos, sobretudo os materiais fibrosos (cascas) e muito finos (pó). Em fornalhas com o fundo do tipo grelhas (*step grades*), os problemas técnicos englobam desde a combustão do material fino nas primeiras zonas da fornalha, que além de ocasionar um perigo iminente de incêndio, já que o material é queimado muito próximo do local de alimentação, até a ocorrência de paradas de manutenção devido ao entrelaçamento do material no abastecimento do sistema por uma rosca sem fim. Os problemas encontrados impedem que a queima do material ocorra de forma lenta e gradual, sendo necessário um pré-tratamento como a peletização ou briquetagem para aumentar a homogeneidade e densidade do produto (Krook; Mårtensson; Eklund, 2006; Kaliyan, Morey; 2009; Thiffault *et al.*, 2018).

A densificação influencia diretamente no custo de aproveitamento do resíduo, sendo que o preço do mesmo adensado e posto na fábrica deve ser igual ou menor do preço de aquisição dos cavacos de madeira a fim de ser viável economicamente. Entretanto, os condicionantes que abarcam este desafio ainda não foram estudados por completo, sendo que o uso da biomassa florestal e outros resíduos lignocelulósicos em projetos industriais depende da viabilidade econômica dos investimentos para a conversão da biomassa em energia, incluindo a aquisição de equipamentos; o custo de transporte e manuseio (ou densificação do material), e o conhecimento da composição do material, como a densidade energética e o teor de umidade, bem como o preço da energia gerada por fontes tradicionais já utilizadas (Brand *et al.*, 2011; Acuna *et al.*, 2012; Sosa *et al.*, 2015; Eufrade-Junior, 2019).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal investigar a viabilidade técnico-econômica da utilização de resíduos lignocelulósicos de uma indústria de painéis de madeira como fonte alternativa para suprir parcialmente a demanda de

cavacos de madeira para queima em caldeiras de forma determinística e em condições de risco.

Para alcançar o objetivo proposto, foram investigadas as características físicas e químicas dos resíduos lignocelulósicos e avaliado seu potencial energético em substituição a madeira picada (tradicionalmente utilizada). Posteriormente foram coletados dados operacionais do processo de briquetagem e do transporte para abastecimento da caldeira. Por fim foi realizada a análise dos indicadores econômicos de maneira determinística e analisar o valor presente líquido (VPL) sob condições de risco pelo Método de Monte Carlo.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Cadeia de operações da indústria de painéis de madeira e cenários propostos

Os resíduos da indústria de painéis de madeira localizada na região centro-sul do Estado de São Paulo de base florestal clonal de *Eucalyptus* spp. com ciclo de corte de 7 anos de idade foram utilizados para complementar o abastecimento de combustível sólido de cavacos de madeira de uma caldeira flamotubular vertical para geração de energia térmica. Dentre os resíduos aproveitados, citam-se as cascas picadas, que eram geradas após o descascamento, picagem e classificação das toras; e os resíduos ao longo do processo industrial, que provém dos descartes das etapas de desfibramento (para as chapas de MDF) ou produção de partículas (para as chapas de MDP), da mesa formadora, prensagem, corte e lixamento.

Foi considerada uma indústria de painéis com capacidade produtiva de 700.000 m³ por ano de painéis de madeira, a quantidade gerada de biomassa residual oriunda dos processos de fabricação foi de 5000 t mês⁻¹ de cascas picadas, 2000 t mês⁻¹ de resíduos de MDF e 500 t mês⁻¹ de resíduos de MDP.

Assim, o abastecimento da caldeira (com capacidade de 18 t h⁻¹) ocorreu de forma a garantir a quantidade mínima de biomassa para atender a demanda energética mensal considerando 720 horas produtivas por mês e um rendimento de 90%. Neste estudo de caso, seriam necessários 11.664 t mês⁻¹ de cavacos de madeira, que forneceriam um consumo energético de 134.136 GJ mês⁻¹ (Tabela 2.1).

Tabela 1 – Parâmetros e consumo mensal da caldeira

Parâmetros	Valor
Quantidade de biomassa (t mês ⁻¹)	11.664
Poder calorífico útil (MJ kg ⁻¹)	11,50
Rendimento energético (%)	90,0
Demanda energética (GJ mês ⁻¹)	134.136

Fonte: Dados de Pesquisa (2023).

A caldeira foi atendida em duas rotas tecnológicas, sendo a primeira (rota 1 ou atual) a tradicionalmente utilizada e composta pelos cavacos de madeira (biomassa padrão para fins comparativos) e cascas picadas provenientes da picagem e descascamento das toras na indústria, e a segunda (rota 2 ou proposta) composta pelos cavacos de madeira e os resíduos densificados, incluindo os briquetes de cascas picadas e briquetes de resíduos do processo produtivo do MDF e do MDP.

As cascas picadas podem ser utilizadas sem densificação, embora enfrentem diversos problemas operacionais, desde seu baixo peso para transporte e densidade energética. Já os resíduos de MDF e MDP, tecnicamente, só podem ser aproveitados na forma densificada devido sua baixíssima densidade à granel.

A determinação dos custos das rotas tecnológicas e viabilidade econômica incluíram tanto as etapas operacionais (como os custos logísticos), quanto a aquisição de máquinas e equipamentos para a densificação dos resíduos (no caso dos materiais briquetados). Foram utilizados rendimentos descritos na literatura e dados provenientes das empresas fabricantes. Na medida de pertinência, o custo operacional foi caracterizado pelo somatório dos custos variáveis - mão de obra, combustível, lubrificação, reparos e manutenção, determinados em cada atividade. Todos os custos foram determinados com base na quantidade de biomassa em reais por tonelada (R\$ t⁻¹).

Particularmente, no levantamento dos custos da etapa de transporte, considerou-se a quantidade biomassa transportada por quilômetro rodado para uma composição com capacidade útil de carga de 20 t para as cascas picadas (carreta do tipo fundo móvel) ou 48 t para a biomassa na forma residual (carretas bitrem do tipo carga seca). Para o estudo de caso, o raio de transporte da biomassa residual

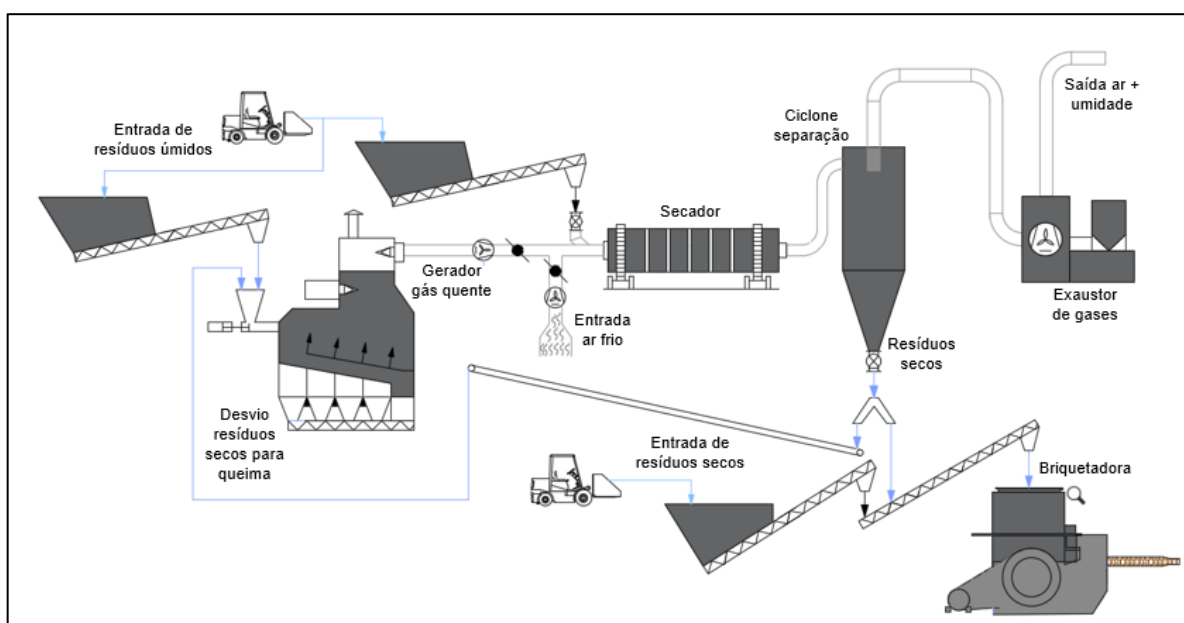
até o centro de consumo era de 230 km. Adicionalmente, foi ainda avaliada a distância máxima viável para transporte do material briquetado até 500 km. Foi considerado o preço médio do frete para o mercado na região do estudo, que variou entre R\$12,31 a R\$18,74 por quilometro rodado.

2.2.2 *Densificação e caracterização física e química dos resíduos lignocelulósicos*

Considerou-se a instalação de uma usina de briquetagem na indústria de painéis de madeira. A biomassa residual encaminhada ao processo de briquetagem (Figura 2.1) deve possuir umidade (base úmida) abaixo de 16%, sendo necessária uma etapa adicional de secagem para todos os resíduos estudados que apresentaram umidade acima do reportado.

O processo de briquetagem nada mais é do que a compactação do material, através do processo mecânico. O sistema consiste em na entrada de resíduos úmidos que são destinados para o secador e para geração de gás quente (utilizado no próprio secador – processo de secagem do material), após a secagem, o material é retirado do secador por transporte pneumático gerado pelo exaustor de gases. O material é direcionado através de roscas de transportes para o silo de armazenamento da briquetadora.

Figura 1 – Esquema do processo de briquetagem



Fonte: Próprio autor (2023).

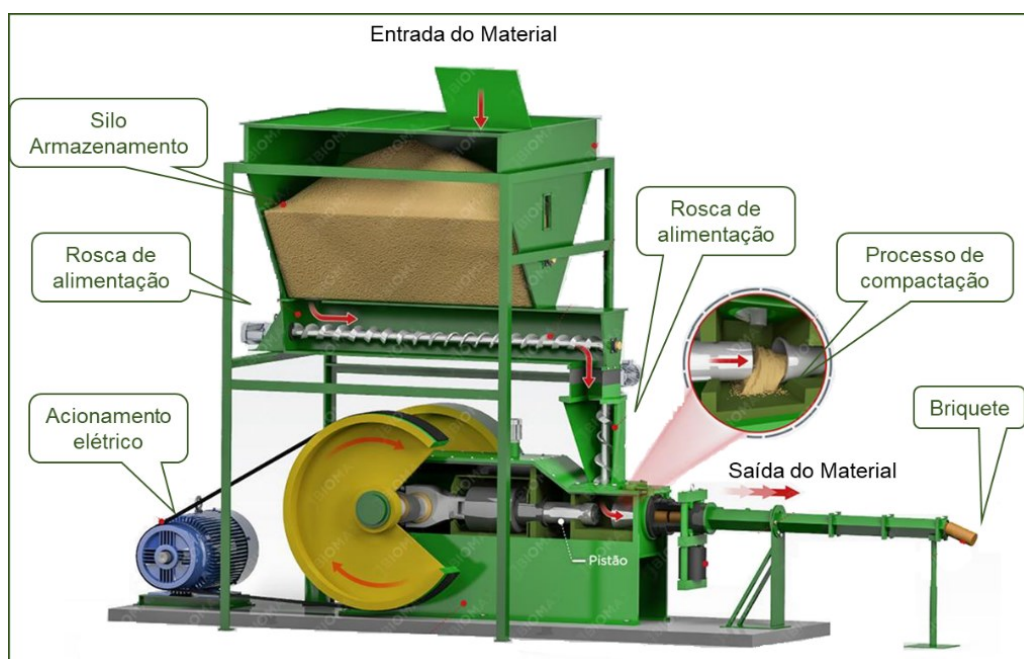
Para atender a demanda, o sistema utilizado foi da empresa Biomax e possuía dois secadores dimensionados para resíduos com umidade inicial máxima de 55% (base úmida) e umidade de saída de 12% a 14% (base úmida) sendo do modelo tipo tambor B 22000. Também, quatro briquetadoras, modelo B 105/240, com sistema mecânico com pistão, pressão de trabalho exercida na compactação de 1200 kgf cm⁻² e velocidade de 200 golpes por minuto (Figuras 2.2 e 2.3). Desta forma, a usina de briquetagem dimensionada tem capacidade de processar 60.000 t ano⁻¹, ou seja, toda a quantidade de resíduos disponível de cascas picadas, MDF e MDP do caso de estudo.

Figura 2 – Briquetadora para compactação dos resíduos



Fonte: Biomax ([S.d.]), modificado pelo autor.

A figura 2.2 apresenta a instalação de uma briquetadora em condições reais de operação na cidade de São Leopoldo – RS.

Figura 3 – Desenho esquemático da briquetadora

Fonte: Biomax ([S.d.]), modificado pelo autor.

A figura 2.3 apresenta as principais partes de uma briquetadora.

O investimento inicial para a aquisição do sistema de briquetagem está descrito na Tabela 2.2.

Tabela 2 – Investimento do sistema de briquetagem

Detalhamento do investimento	Qtd.	Valor em R\$
Projeto técnico/civil	1	R\$ 50.000,00
Briquetadora c/ acessórios	4	R\$ 2.660.000,00
Secador Industrial	2	R\$ 2.916.000,00
Instalações, equipamentos e fretes	4	R\$ 800.000,00
Construção, prédios e infraestrutura	1.000 m ²	R\$ 1.800.000,00
Licenças e documentações	1	R\$ 20.000,00
Contingência (2,5%)	2,5%	R\$ 206.150,00
Total do Projeto		R\$ 8.452.150,00

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Foi considerando ainda, que a usina de briquetagem operou 24h por dia útil comercial, em 3 turnos de trabalho com seis funcionários, durante todos os meses

do ano, parando apenas para uma manutenção programada para reforma dos secadores (Tabela 2.3).

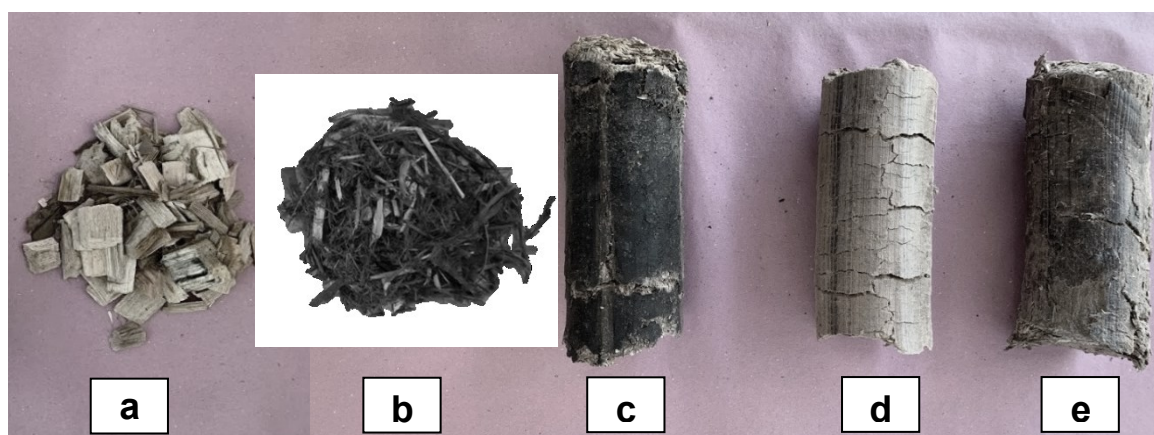
Tabela 3 – Outros parâmetros da usina de briquetagem projetada

Parâmetros	Valores
Número de dias trabalhados por mês	30
Número de horas trabalhadas por dia	24
Número de funcionários por turno	6
Custo mensal por funcionário	R\$ 5.000,00
Tarifa de energia elétrica	R\$ 0,32 kWh-1
Rendimento horário	90%
Valor do custo unitário básico (CUB)	R\$ 2.000,00

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

2.2.3 Propriedades físicas e químicas dos resíduos lignocelulósicos

As formas da biomassa residual (Figura 2.4) foram caracterizadas por meio da determinação em duplicata da umidade, densidade aparente, composição química imediata (cinzas, materiais voláteis e carbono fixo), poder calorífico superior e poder calorífico útil. As propriedades foram parâmetros necessários para os cálculos de conversão energética.

Figura 4 – Formas das biomassas florestais

Fonte: Próprio autor (2023).

NOTA: a – cavacos de madeira; b – cascas picadas; c – briquete de cascas picadas; d – briquete de rejeitos de MDF; e e – briquete de rejeitos de MDP

As normas técnicas utilizadas para determinação das propriedades são apresentadas na Tabela 2.4 e foram adaptadas na medida de pertinência das normas utilizadas para a madeira, sendo que as análises foram realizadas em duplicata com quatro repetições cada. Por último, foi ainda determinada a densidade energética dos materiais por meio do produto da densidade aparente e poder calorífico útil.

Tabela 4 – Normas e metodologia dos ensaios laboratoriais.

Propriedades físicas e químicas	Sigla	Metodologia adotada
Cinzas	CZ	ASTM D1102 – 84 (2007)
Poder calorífico superior	PCS	ASTM E711-84 (2004)
Poder calorífico útil	PCU	EN 14918 (2005)
Densidade aparente de cavacos	DA	ABNT NBR 14984 (2003)
Umidade da madeira	UBU	ASTM E871 – 82 (2006)

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Ainda, a fim de comparar estatisticamente as biomassas, testou-se a normalidade dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk, posteriormente aplicou-se com o teste de comparação de médias (Tukey) a nível de significância de ‘5%. Todos os dados foram analisados no ambiente do software estatístico R (R, 2023).

2.2.4 Análise econômica do projeto sob condições de risco

Foi avaliado o projeto de abastecimento da caldeira com as diferentes biomassas levando em conta a demanda energética mensal e a quantidade respectiva de material em toneladas necessária para supri-la. A análise econômica foi feita a partir de um conjunto de indicadores, como o valor presente líquido (VPL), a taxa de interna de retorno (TIR) e o payback (Motta et al., 2009; Brealey; Myers; Marcus, 2019) para um horizonte de planejamento de 10 anos e uma taxa de desconto de 18%. A taxa de desconto de 18% é composta de 13,75% (Taxa SELIC base março 2023) acrescida de 4,25% (acionistas) para cobrir riscos eventuais. A taxa de desconto utilizada é o resultado mínimo esperado pela empresa para remunerar o capital investido em projetos de engenharia no setor florestal.

O cálculo do VPL é a soma dos valores atuais de cada um dos fluxos de caixa, sendo considerados viáveis os investimentos que apresentam valores positivos. A determinação geral para o método do VPL está apresentada na Equação (1).

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} - CF_0 \quad (1)$$

Em que,

CF_j – valores de entrada ou saída de caixa em cada período, R\$;

CF_0 – valor do investimento inicial, R\$;

j – período de tempo, em anos;

i – taxa de desconto do projeto, %.

A taxa de desconto que zera no VPL de um projeto é denominada de TIR (Equação 2) e ela deve ser maior que o retorno mínimo esperado pelo investidor para o projeto avaliado ou taxa mínima de atratividade (TMA).

$$TIR = i \left| \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} = CF_0 \right. \quad (2)$$

Em que,

CF_j – valores de entrada ou saída de caixa em cada período, R\$;

CF_0 – valor do investimento inicial, R\$;

j – período de tempo, em anos;

i – taxa de desconto do projeto, %.

O payback é denominado como o tempo de pagamento do investimento ou empréstimo, que se leva para recuperar o investimento para zerar seu fluxo acumulado. Para obtenção do payback econômico ou Retorno Econômico (PB) é considerado o fluxo de caixa descontado - Equação (3).

$$PB = n \left| \sum_{j=0}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j} \right| = 0 \quad (3)$$

Em que,

CF_j – valores de entrada ou saída de caixa em cada período, R\$;

j – período de tempo, em anos;

i – taxa de desconto do projeto, %.

Além dos parâmetros já descritos, levou-se em conta os investimentos em máquinas e equipamentos, bem como as despesas recorrentes de funcionamento da atividade, respectivamente definidas como despesas de capital (*capital expenditure*, ou CAPEX) e despesas operacionais (*operational expenditure*, ou OPEX).

Para as simulações em condições de risco pelo método de Monte Carlo foi utilizado o programa computacional @RISK, desenvolvido pela empresa Palisade, que tem interface com a plataforma Microsoft Excel (Palisade, 2023).

Estão presentes no setor da indústria de painéis de madeira várias fontes de risco, como o risco dos custos logísticos, ou seja, as variações dos preços dos combustíveis e pedágios podem afetar o preço final da biomassa; o risco institucional: se origina da incerteza sobre o impacto de políticas governamentais principalmente na gestão energética do país; o risco financeiro, ou seja, o financiamento de áreas para o plantio das florestas, além de riscos legais e pessoais, como ocorre em toda a atividade produtiva.

Dentre os riscos passíveis, foram consideradas como variáveis de risco para o estudo, o valor total de investimento do projeto e o preço de cavaco de madeira (fonte tradicionalmente utilizada para alimentação das caldeiras e que estariam disponíveis no mercado).

Para o valor do investimento do projeto, valor utilizado para a construção e aquisição dos equipamentos necessários para o processo de briquetagem. Com base nos históricos de projetos realizados pela própria empresa, o valor do

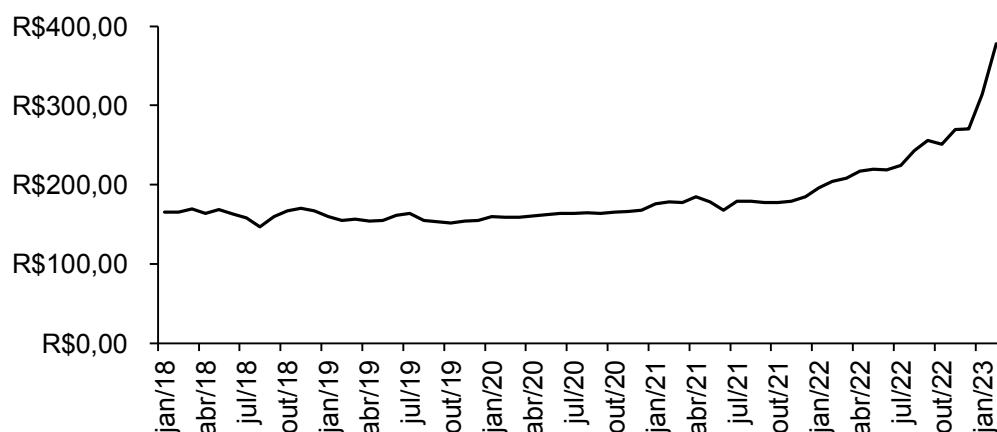
investimento pode oscilar de um máximo de 10% acima do valor orçado, bem como para 5% abaixo do referido valor. Os fatores que podem causar variação são os preços dos equipamentos, preços do material de construção civil e ainda os preços dos cabos elétricos. A função de distribuição de probabilidade dos investimentos iniciais foi a triangular, onde foram consideradas 10.000 interações, sendo o valor modal R\$ 8.452.150,00; o valor mínimo foi 5% abaixo do total previsto, sendo R\$ 8.029.542,50; e para o valor máximo foi 10% acima do total previsto, ou seja, R\$ 9.297.365,00.

Para o preço de cavaco de madeira, foi utilizado um registro histórico da empresa dos últimos anos (2018 a 2023), conforme Figura 2.5. Esses valores consideram o valor da madeira em pé, acrescido dos valores médios de transporte até a fábrica. Os valores foram deflacionados de acordo com o IGP-M divulgado pela Fundação Getúlio Vargas, com base no mês de fevereiro de 2023.

Após o deflacionamento da série histórica, foi utilizado o software @risk para ajustar a função mais adequada através do recurso *Distribution Fitting*, resultando na indicação da distribuição Beta (RiskBetaGeneral) por apresentar melhores resultados de ajustamento segundo o teste Chi Quadrado.

O preço da madeira é uma das principais variáveis de incerteza do projeto e sua oscilação ocorre em função da demanda do mercado. No estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul, grandes empresas de celulose se instalaram nos últimos anos, aumentando significativamente a demanda por madeira.

Figura 5 – Variação do preço de cavacos de madeira em R\$ por tonelada posto na fábrica no período de 01/2018 a 02/2023



2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização da biomassa residual e seu efeito no processo de densificação

As propriedades físicas e químicas das biomassas lignocelulósicas, antes e após a densificação, estão apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 5 – Caracterização física e química dos resíduos estudados

Biomassas florestais	UBU	DA	CZ	PCS	PCU	DE
	(%)	(kg m ⁻³)	(%)	(MJ kg ⁻¹)	(MJ kg ⁻¹)	(MJ m ⁻³)
<i>Materiais não densificados</i>						
Cavaco de madeira	34,4 a	225 a	0,7 a	18,5 a	11,5 b	2,6 a
Cascas picadas	30,7 a	95 b	3,3 c	17,7 b	10,5 c	1,0 b
Resíduos de MDF	29,0 b	69 c	0,2 a	17,4 b	10,7 c	0,7 c
Resíduos de MDP	7,1 c	62 c	1,2 b	18,6 a	15,9 a	1,0 b
<i>Materiais densificados</i>						
Briquete de casca	6,4 a	393 a	5,3 a	18,2 a	15,6 a	5,3 b
Briquete MDF	8,7 a	380 a	1,1 b	18,6 a	15,8 a	5,9 a
Briquete MDP	9,8 a	355 a	1,6 b	17,7 b	14,7 b	5,2 b

UBU – Umidade base úmida; DB – Densidade básica; DA – Densidade aparente (a granel); CZ – cinzas; PCS – Poder calorífico superior; PCU – Poder calorífico útil; DE – Densidade energética estimada. As médias não se diferem para um nível de significância $p < 0,05$ pelo teste de Tukey para as mesmas letras na mesma propriedade e condição.

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Do ponto de vista operacional, levando em conta a baixa densidade aparente (abaixo de 100 kg m⁻³) das cascas picadas e dos resíduos de MDF e MDP, é imprescindível que haja a densificação dos materiais, já que a briquetagem aumenta a densidade energética melhorando as características para combustão direta (Krook; Mårtensson; Eklund, 2006; Thiffault *et al.*, 2018). Na prática, utiliza-se o poder calorífico útil ou líquido (PCU) que é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas devido a umidade (Telmo;

Lousada, 2011) e como pôde ser constatado, a biomassa residual densificada apresentou pelo menos o dobro da densidade energética.

A maior concentração dos elementos inorgânicos nos briquetes, sobretudo para os resíduos de MDF e as cascas picadas podem ser explicados devido a secagem do material, etapa que antecede o encaminhamento da biomassa para briquetadora, que pode ter promovido um acúmulo de minerais na fração seca após evaporação da água da seiva bruta, o mesmo comportamento foi observado por Eufrade-Junior *et al.* (2021) monitorando a perda de umidade de toras longas de eucalipto ao longo do tempo. Em termos caloríficos, as cinzas não contribuem energeticamente e ainda podem corroer os equipamentos metálicos e aumentar os custos de manutenção (Monti *et al.*, 2008)

A umidade (base úmida) da biomassa pode variar, sendo comum os valores médios entre 29-53% respectivamente para seca ao ar e biomassa recém-colhida, como observado para os cavacos de madeira e as cascas picadas (Zanuncio, *et al.*, 2015; Eufrade-Junior *et al.*, 2021). De fato, houve umidade acima do recomendado para o processo de briquetagem nos resíduos de cascas picadas e MDF, sendo assim eles foram secos para alcançar valores menores de 16% (base úmida). A alta umidade dos resíduos de MDF pode ser explicada pelo material encharcado que é oriundo da etapa denominada “ciclone de partida” do processo industrial para produção de painéis, após sua rejeição na fábrica. O ciclone de partida ou *start ciclone* é uma etapa no processo que recebe as fibras, encoladas ou não, antes do processo de secagem. Normalmente são destinadas as fibras para este equipamento logo no início do processo de desfibrção, aonde as fibras ainda não estão uniforme para o processo de produção.

Ainda para os resíduos de MDF, os mesmos podem ser também provenientes de rejeitos do secador, neste último, a fibra apresenta baixa umidade de 9% a 15% (base úmida) e poderia ser encaminhada diretamente para a briquetadora ou mesmo utilizado para misturar com os resíduos mais úmidos a fim de formar blendas mais secas para a queima, sendo uma prática rotineira para propósitos energéticos (Fernandez *et al.*, 2017).

Ainda na briquetagem da biomassa é importante considerar a quantidade obtida no final do processo, já que foi reduzida em até 35%, e isto se deve a utilização de parte do material para alimentar a fornalha do sistema (próximo de 20% - dados do fabricante) e a própria perda de umidade do material – vide a quantidade

disponível no estudo de caso, antes e após a briquetagem, na Tabela 2.6. Embora houve uma redução, os materiais densificados apresentaram um elevado acúmulo energético, como discutido anteriormente, sendo superior ao desempenho dos cavacos de madeira, que são tradicionalmente utilizados como combustíveis sólidos em caldeiras.

No geral, as características físicas e químicas obtidas estão dentro do reportado na literatura para biomassas florestais (Sheng; Azevedo, 2005; Farage *et al.*, 2013; Souza; Vale, 2016; Guerra; Eufrade-Junior, 2019), com destaque para os altos valores de PCU para os briquetes, que mostram o potencial dos resíduos para geração de energia. Os valores foram referenciais para os cálculos nos tópicos seguintes.

Tabela 6 – Quantidade de biomassa (em toneladas) após briquetagem, descontadas as perdas do processo

Formas da biomassa residual	Forma não densificada (t)	Forma densificada (t)	Redução total (%)
Cascas picadas	5.000	3.252	34,96
Resíduos de MDF	2.000	1.328	33,60
Resíduos de MDP	500	500	0

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

2.3.2 Consumo energético mensal, custos transporte e briquetagem.

A partir do consumo energético mensal (Tabela 2.2.1) foram calculados os custos de transporte e briquetagem para utilização dos resíduos lignocelulósicos. Considerando que a biomassa residual foi transportada para atender uma caldeira a 230 km da fonte consumidora, determinou-se a quantidade de viagens e o custo por tonelada transportada das diferentes biomassas residuais estudadas (Tabela 2.7). O maior valor de frete encontrado foi o transporte das cascas picadas não densificadas, pois exigiram quase quatro vezes mais viagens do que os resíduos densificados. O valor foi compatível com o praticado pelas empresas florestais da região do estudo.

Tabela 7 – Frete em reais por tonelada das diferentes formas de biomassas florestais para uma distância de 230 km

Condições	Forma não densificada	Forma densificada dos resíduos (briquetes)		
	Cascas picadas	Casca	MDF	MDP
Capacidade de carga útil (t)	20	48	48	48
Frete por viagem (R\$)	2.831,67	4.312,22	4.312,22	4.312,22
Biomassa disponível (t)	5.000	3.252	1328	500
Qtd. de viagens (un)	250	68	28	10
Frete (R\$/t)	141,58	89,84	89,84	89,84

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Além do investimento inicial (vide Tabela 2.2), os custos mensais para a operação da usina de briquetagem para resíduos úmidos ou secos foram detalhados na Tabela 2.8. Como detalhado no item anterior, apenas os resíduos de MDF precisariam ser secos e tiveram um custo 17,2% maior do que os demais resíduos que foram encaminhados direto para as briquetadoras.

Tabela 8 – Custo operacional mensal detalhado do processo de briquetagem

Custo da operação mensal	Resíduo úmido UBU≥16% (R\$)	Resíduo seco UBU<16% (R\$)
<i>Discriminado por item</i>		
Mão de obra e encargos (3 turnos)	90.000,00	89.994,24
Materiais e manutenção	76.654,08	76.671,36
Consumo de energia elétrica	75.769,34	36.288,00
Outros	25.920,00	25.920,00
<i>Total por mês</i>	<i>268.343,42</i>	<i>228.873,60</i>
<i>Por tonelada de resíduo</i>		
Mão de obra e encargos (3 turnos)	17,36	17,36
Materiais de manutenção	14,79	14,79
Consumo de energia elétrica	14,62	7,00
Outros	5,00	5,00
<i>Total por tonelada</i>	<i>51,76</i>	<i>44,15</i>

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

O custo total do aproveitamento das biomassas residuais, que inclui o preço da matéria-prima, transporte e densificação está sumarizado na Tabela 2.9. O transporte representou até 59,1% do custo total mensal para abastecimento da caldeira pelas biomassas briquetadas, chegando a 90% para as cascas picadas que não foram densificadas. Já a briquetagem foi o equivalente a quase um terço do valor mensal determinado. Os resultados encontrados estão de acordo com o obtido por Eufrade-Junior (2019), que dada as diferentes condições do presente estudo, avaliou a cadeia de operações florestais para o abastecimento de uma termelétrica no Estado de São Paulo, utilizando apenas cavacos de madeira.

De forma complementar, os custos encontrados podem ser ainda maiores, caso a biomassa residual seja transportada para distâncias longas, considerado o mesmo número de viagens estimados, como exemplificado na Figura 2.6. Destaque

para as cascas picadas, que tiveram o maior aumento, mostrando que para distâncias maiores, o adensamento do material é uma opção viável para reduzir os custos com fretes, já que os briquetes resultam em um menor número de viagens quando comparado com o mesmo material na sua forma não-densificada ou à granel. Vale ressaltar ainda, que os valores apresentados podem alterar em função do tipo de veículo considerado no transporte (Alves *et al.*, 2013).

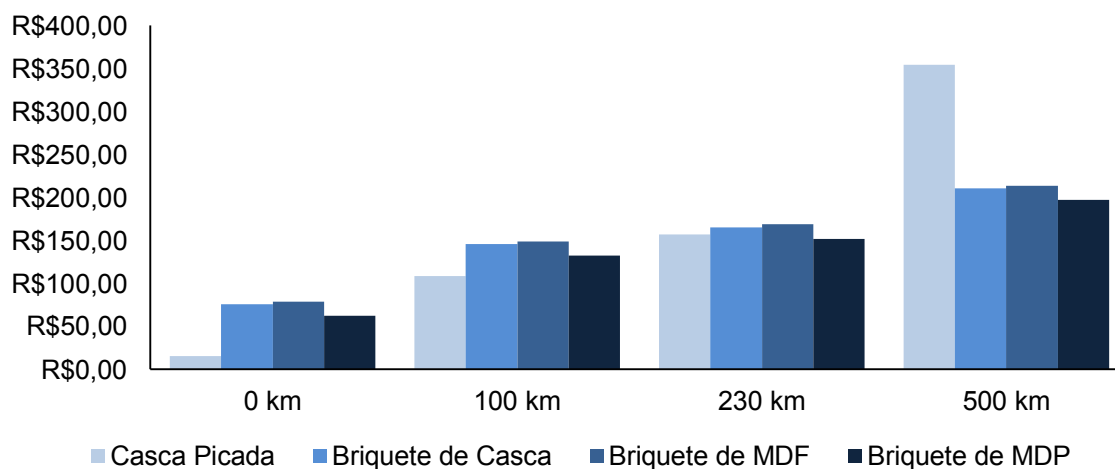
Tabela 9 – Custo total (R\$ mês⁻¹) do aproveitamento das biomassas residuais nas diferentes operações consideradas

<u>Custo</u>	<u>Cascas picadas</u>		<u>Briquete de cascas</u>		<u>Briquetes de MDF</u>		<u>Briquetes de MDP</u>	
	<u>(R\$)</u>	<u>%</u>	<u>(R\$)</u>	<u>%</u>	<u>(R\$)</u>	<u>%</u>	<u>(R\$)</u>	<u>%</u>
Matéria-prima	77.500	10%	77.500	14%	36.000	16%	9.000	12%
Transporte	707.918	90%	292.153	54%	119.305	53%	44.919	59%
Densificação			168.336	31%	68.742	31%	22.075	29%
Total por mês	785.418		537.989		224.047		75.994	
Matéria-prima	15,50	10%	15,50	9%	18,00	11%	18,00	12%
Transporte	141,58	90%	89,84	54%	89,84	53%	89,84	59%
Densificação			60,10	36%	60,87	36%	44,15	29%
Total por tonelada	157,08		165,44		168,71		151,99	

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

De acordo com o gráfico da Figura 2.6, podemos notar que o custo da biomassa posto fábrica é diretamente proporcional à distância que a biomassa está do local de consumo. Nas distâncias até 100 km, o transporte “in natura” é a opção mais econômica. Para as distâncias de 230 km, os custos de transporte entre material “in natura” e o material adensado praticamente foram os mesmos. Para distâncias de 500 km, o transporte de biomassa adensada é a melhor opção economicamente.

Figura 6 – Custo das formas da biomassa residual posto em fábrica em diferentes distâncias



Fonte: Dados de pesquisa (2023).

2.3.3 Rotas tecnológicas e análises econômicas

A Tabela 2.10 apresenta a quantidade de biomassa considerando a demanda energética anterior da caldeira em duas opções de abastecimento, sem e com a biomassa residual densificada. É possível observar que mais da metade (52,3%) da demanda energética mensal da caldeira poderia ser suprida com utilização dos briquetes dos resíduos da indústria de painéis de madeira (casca, resíduos de MDF e MDP), reduzindo também os custos operacionais já que os cavacos de madeira apresentam um valor oneroso no mercado. Para os cálculos determinísticos dos indicadores econômicos, considerou-se o preço de cavaco de madeira de R\$ 231,39 por tonelada, valor médio dos últimos 12 meses (vide Figura 2.4).

Tabela 10 – Parâmetros e consumo mensal da caldeira em diferentes cenários de uso

Parâmetros	Rota atual (1)		Rota proposta (2)			
	Cavaco de Madeira	Casca	Cavaco de Madeira	Briquetes de		
				Casca	MDF	MDP
Quantidade de biomassa (t)	7.081	5.000	4.733	3.252	1.328	500
Poder calorífico útil (MJ kg ⁻¹)	11,50	10,54	11,50	15,60	15,83	15,91
Demanda energética (GJ)	81.436	52.700	54.428	50.731	21.022	7.955
Custo entregue (R\$ t ⁻¹)	231,39	157,08	231,39	165,43	168,71	151,99
Custo total (milhões de R\$)	1,64	0,79	1,10	0,54	0,22	0,08

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

A diferença entre os valores gastos mensalmente pela rota 1 (atual) e a rota 2 (proposta) é de R\$ 490.812,55 reais (Tabela 2.11). O valor total de R\$ 5.889.750,56 será o valor do ganho anual utilizado no fluxo de caixa na análise do investimento.

Tabela 11 – Quantidade de biomassa e custo operacional mensal, no mesmo período de tempo, para abastecimento da caldeira em diferentes rotas tecnológicas

Rotas tecnológicas	Quantidade t mês ⁻¹	Custo total milhões R\$	Diferença milhões R\$
Rota 1 (atual)	12.081	2,42	
Rota 2 (proposta)	9.813	1,93	-0,49

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

O investimento necessário para a construção de uma usina de briquetagem é de R\$ 8,4 milhões de reais (Tabela 2.2), incluindo a construção de galpão de produção e todos os equipamentos necessários para a produção. Os dados de fluxo de caixa e fluxo de caixa descontado para as rotas estudadas, usando uma taxa de desconto de 18%, estão descritos na Tabela 2.12.

Tabela 12 – Fluxo de caixa e Fluxo de caixa descontado

Período (anos)	Fluxo de Caixa R\$	Fluxo de Caixa descontado R\$	FCL acumulado R\$
0	(8.452.150)	(8.452.150)	(8.452.150)
1	5.889.751	4.991.314	(3.460.836)
2	5.889.751	4.229.927	769.091
3	5.889.751	3.584.684	4.353.775
4	5.889.751	3.037.868	7.391.643
5	5.889.751	2.574.464	9.966.107
6	5.889.751	2.181.749	12.147.857
7	5.889.751	1.848.940	13.996.797
8	5.889.751	1.566.898	15.563.695
9	5.889.751	1.327.880	16.891.575
10	5.889.751	1.125.322	18.016.897

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Em condições determinísticas, os fluxos de caixa descontados resultam em indicadores de viabilidade econômica apresentados na Tabela 2.13. O conjunto de indicadores econômicos, importante para auxiliar na tomada de decisão em diferentes configurações de uma mesma proposta (Maqhuzu; Yoshikawa; Takahashi., 2017; Li; Guiping, 2016), mostrou que a utilização dos resíduos na forma densificada apresentam-se viáveis economicamente mesmo no horizonte curto de planejamento (10 anos) para o setor florestal, apresentando um TIR acima de 40%, VPL de R\$ 18 milhões e *payback* a partir do segundo ano.

Tabela 13 – Indicadores e análise de viabilidade do projeto

Parâmetros e indicadores	Rota 2 proposta
Investimento Inicial (R\$)	8.452.150,00
Duração do projeto, (anos)	10
Valor presente líquido (R\$)	18.016.897,00
Taxa interna de retorno (%)	43,49
<i>Payback</i> econômico (anos)	3

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Através de cálculos determinísticos, o investimento de R\$ 8,4 milhões para a construção da usina de briquetagem apresenta TIR de 43,49%, payback descontado de 3 anos e VPL de R\$ 18 milhões de reais, mesmo considerando uma taxa mínima de atratividade de 18%.

De forma geral, a utilização de resíduos de processos, adensado ou não, para a geração de energia térmica ao invés de cavacos de madeira é uma opção economicamente viável. Para distâncias próximas de 100km, a utilização da biomassa casca picada “in natura” se apresenta mais viável economicamente, uma vez que não necessita de investimentos adicionais para processamento do material.

Para distancias de 230km, uma alternativa técnica para reduzir os custos de transporte é o adensamento do material. Embora custos adicionais para o processamento e secagem do material sejam necessários, os custos de transporte serão reduzidos em aproximadamente 35,5% para transportar a mesma energia em material briquetado.

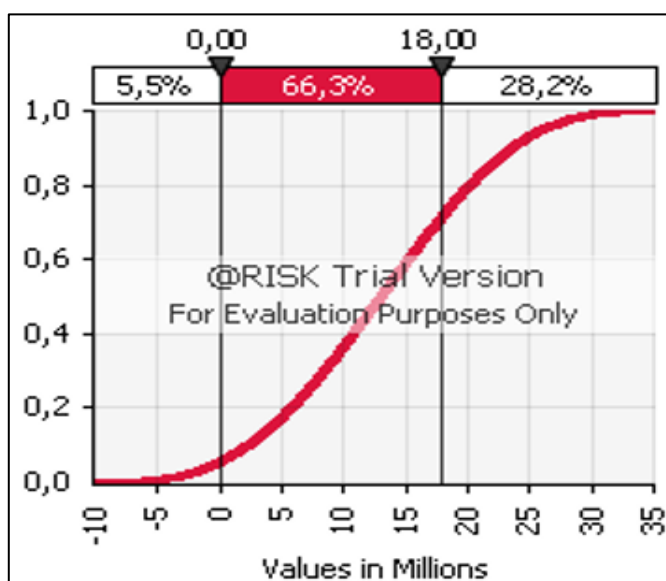
2.3.4 Simulações de Monte Carlo

Após as simulações, considerando a variação do preço do cavaco posto fábrica e a variação do valor do investimento, a análise econômica sob condições de risco da rota 2 proposta, a qual utiliza briquetes e complementada com cavacos de madeira, apresenta valor presente líquido (VPL) positivo até R\$ 18 milhões de reais com percentil de risco de 66,3%, como demonstrado na Figura 2.7.

O projeto continua se mostrando viável economicamente mesmo com uma elevada taxa mínima de atratividade de 18% e alto investimento inicial de 8,4

milhões de reais. Este último ainda pode ser menos impactante já que é tratado como dispêndio com ativos fixos na maioria das grandes empresas que preparam um orçamento anual com os principais projetos a serem custeados (Brealy; Myers, 2019).

Figura 7 – Valor Presente Líquido da utilização da biomassa residual briquetada



Fonte: Próprio autor (2023).

Como complemento mostrado anteriormente, na Tabela 2.14 estão apresentados os parâmetros obtidos na simulação realizada para 10.000 interações pelo Método de Monte Carlo. As condições favoráveis para a viabilidade da Rota 2 está atrelada ao histórico do preço do cavaco de madeira, que tende a se manter em patamares elevados nos próximos anos (vide Figura 2.5). Os resultados mostram ainda que as chances de obtenção de um resultado negativo são de apenas 5,5% o que aponta para elevadas chances do projeto de investimento se apresentar viável economicamente.

Tabela 14 – Valor Presente Líquido sob condições de risco

Parâmetros e indicadores	Valores em reais (R\$)
Mínimo	-9.566.945,02
Máximo	35.331.209,24
Média	12.956.340,33
Desvio Padrão	8.018.120,63
Iterações	10.000

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

Os valores estatísticos de risco para o valor presente líquido (VPL) da rota 2 proposta foram apresentados na Tabela 2.14. O valor mínimo apresentou valor negativo, ou seja, existe o risco de o projeto apresentar VPL negativo embora a probabilidade de ocorrência deste evento seja muito pequena. Em uma análise mais otimista podemos avaliar o valor máximo para o VPL em R\$ 35 milhões de reais e 28,2% com probabilidade de o VPL ser acima de R\$ 18 milhões de reais.

Tabela 15 – Análise de sensibilidade da utilização da biomassa residual briquetada

Percentil de Risco (%)	Valores em reais (R\$)
5%	-341.140,00
10%	2.255.237,00
15%	4.174.956,00
20%	5.746.799,00
25%	7.160.799,00
30%	8.418.890,00
35%	9.648.699,00
40%	10.764.639,00
45%	11.889.987,00
50%	13.021.628,00
55%	14.086.526,00
60%	15.225.211,00
65%	16.349.055,00
70%	17.559.356,00
75%	18.784.736,00
80%	20.183.190,00
85%	21.688.031,00
90%	23.554.931,00
95%	26.107.479,00

Fonte: Dados de pesquisa (2023).

O mapa de risco conforme apresentado na Tabela 2.15 auxilia o tomador de decisão conforme o perfil de risco. A menores níveis de risco, digamos 15%, o tomador de decisão precisa decidir se o VPL apresentado atende às expectativas de ganho do investidor. A maiores níveis de risco que se caracterizam investidores mais propensos ao risco os valores de retorno são maiores, porém com menores probabilidades de ocorrência.

Verifica-se que, para o mesmo resultado do valor líquido presente (VPL) da análise determinística de R\$ 18 milhões (Tabela 2.13), na análise de sensibilidade encontramos o percentual de risco em 71,8%, conforme Tabela 2.15.

O projeto em questão ainda pode ser mais atrativo se levantado o balanço de emissão de CO₂, já que há o aproveitamento dos resíduos agroindustriais que

seriam descartados, o que poderia comprovar a sua adicionalidade para geração de créditos de carbono, como reportado nos trabalhos de Szymanski, Balbinot e Schirmer (2010) e Cardoso, Santos e Santos (2023). Também, há um interesse maior das instituições em selecionar processos industriais mais sustentáveis do ponto de vista energético e ambiental (Ashkanani *et al.*, 2021).

2.4 CONCLUSÕES

Foi avaliado o uso de resíduos da indústria de painéis de madeira na forma densificada para atender a demanda de uma caldeira para produção de energia térmica. Nas condições avaliadas, mais da metade (59,4%) da demanda energética mensal da caldeira poderia ser suprida com utilização dos briquetes de cascas e de resíduos do processo produtivo de MDF e MDP. Os resíduos briquetados poderiam ainda ser transportados por distâncias de até 500 km sem o aumento demasiado do valor do frete, diferente das cascas picadas (230 km). Também, o processo de briquetagem conferiu uma maior densidade energética quando comparada ao cavaco de madeira, o que foi importante para a reduzir a quantidade de biomassa demandada pela caldeira. A nova rota tecnológica proposta (com uso de resíduos briquetados) é uma alternativa para redução dos resíduos industriais mesmo considerando um horizonte curto de planejamento (10 anos) para o setor florestal e apresentou um TIR acima de 40%, VPL de R\$ 18 milhões e payback econômico a partir do segundo ano, em análise determinística. Nas simulações estocástica, pelo método de monte Carlo, encontramos o percentil de risco em 71,8% para o VPL de R\$ 18 milhões e 5,5% para que o valor seja negativo, por fim, em função do baixo valor de aquisição do resíduo e o valor do cavaco de madeira, verifica-se que o projeto é viável economicamente e sustentável do ponto de vista ambiental (redução dos resíduos).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte acadêmico do Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB/IPBEN), à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP) e a disponibilização dos materiais e suporte técnico das empresas Dexco S.A. e Biomax Indústria de Máquinas Ltda.

REFERÊNCIAS

- ACUNA, M.; MIROWSKI, L.; GHAFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Optimising transport efficiency and costs in Australian wood chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, n. 2, p. 291-300, 2012.
- ALVES, R. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, E. N.; LOPES, E. S.; CARMO, F. C. S. Technical analysis and transportation costs of wood with different types of vehicles. **Árvore**, v. 37, n. 5, p. 897-904, 2013.
- ANEEL. Quantidade de usinas termelétricas por tipo. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- ASHKANANI, H. E.; WANG, R.; SHI, W.; SIEFERT, N. S.; THOMPSON, R. L.; SMITH, K.; STECKEL, J. A.; GAMWO, I. K.; HOPKINSON, D.; RESNIK, K.; MORSI, B. I. . Effect of Power Plant Capacity on the CAPEX, OPEX, and LCOC of the CO₂ Capture Process in Pre-Combustion Applications. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 109, 2021.
- BIOMAX. O que é Briquetagem. **Biomax**, São Leopoldo, RS, [S.d.]. Disponível em: <https://www.biomaxind.com.br/briquetagem/>. Acesso em: 02 mar. 2023.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2581-2588, 2011.
- BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; MARCUS, A. **Fundamentals of Corporate Finance**. 10 ed. New York: McGraw-Hill. 2019. 723 p.
- CARDOSO, E. R.; SANTOS, G. C.; SANTOS, A. O. Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa na agroindústria do médio norte de Mato Grosso -Brasil. **Latin American Journal of Development**, v. 5, n. 1, p. 44-61, 2023.
- EUFRATE JÚNIOR, H. J.; NAKASHIMA, G. T. , YAMAJI, F. M.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 108, p. 636-640, 2017.
- EUFRATE-JUNIOR, H. J. **Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto**. 2019. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2019.
- EUFRATE-JUNIOR, H. J.; SPADIM, E. R.; RODRIGUES, S. A.; DAL PAI, E.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P. S. Impact of rainy and dry seasons on eucalypt fuelwood quality logs stored in piles: a case study in Brazil. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 42, n. 2, p. 291-300, 2021.

FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá - MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/198050988454>.

FERNANDEZ, B. O.; GONÇALVES, B. F.; PEREIRA, A. C. C.; HANSTED, A. L. S.; PÁDUA, F. A.; DA RÓZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, 29-38, 2017.

GARCIA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, v. 117, 1139, 2014.

GUERRA, S. P. S.; EUFRADE-JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu:FEPAF, 2019. 172 p.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KROOK, J.; MÅRTENSSON, A.; EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, n. 2, p. 158-166, 2006.

LI, Q.; GUIPING, H. Techno-economic analysis of biofuel production considering logistic configurations. **Bioresource Technology**, v. 206, p. 195-203, 2016.

LONDO, M.; VAN STRALEN, J.; USLU, A.; MOZAFFARIAN, H.; KRAAN, C. Lignocellulosic biomass for chemicals and energy: an integrated assessment of future EU market sizes, feedstock availability impacts, synergy and competition effects, and path dependencies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 12, p. 1065-1081, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1926>.

MAQHUZU, A. B.; YOSHIKAWA, K.; TAKAHASHI, F. Biofuels from agricultural biomass in Zimbabwe: Feedstock availability and energy potential. **Energy Procedia**, v. 142, p. 111-116, 2017.

MONTI, A.; VIRGÍLIO, N.; VENTURI, G. Mineral composition and ash content of six major energy crops. **Biomass and bioenergy**, v. 32, p. 216-223, 2008.

MOTTA, R.; COSTA, R. P.; NEVES, C.; CALÔBA, G.; GONÇALVES, A.; NAKAGAWA, M. **Engenharia Econômica e Finanças**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 312 p.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels: significance and impact. **Biomass Bioenergy**, v. 30, 973-982, 2006.

PALISADE. **@Risk**: probabilistic risk analysis in Excel. Raleigh, EUA. 2023. Disponível em: <https://www.palisade.com/risk/>. Acesso em: 23 jan 2023.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 Fev. 2023.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 499-507, 2005.

SHUKLA, P.R.; SKEA, J.; SLADE, R.; KHOURDAJIE, A. A.; DIEMEN, R. V.; MCCOLLUM, D.; PATHAK, M.; SOME, S.; VYAS, P.; FRADERA, R.; BELKACEMI, M.; HASIJA, A.; LISBOA, G.; LUZ, S.; MALLEY, J. (Eds.). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of working group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 2029 p. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/2929481A59B59C57C743A79420A2F9FF/9781009157933AR.pdf/Climate_Change_2022_-_Mitigation_of_Climate_Change.pdf?event-type=FTLA. Acesso em: 09 jan. 2022.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338-351, 2015.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono - estudo de caso. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, 901-912, 2010.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

THIFFAULT, E.; GIANVENUTI, A.; ZUZHANG, X.; WALTER, S. **The role of wood residues in the transition to sustainable bioenergy**: Analysis of good practices and recommendations for the deployment of wood residues for energy. Rome: FAO, 2023. 87 p. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3826en>. Acesso em 25 jan 2023.

THIFFAULT, E.; SOKHANSANJ, S.; EBADIAN, M.; REZAEI, H.; OVEISI, E.; GHIASI, B.; YAZDANPANA, F.; ASIKAINEN, A.; ROUTA, J. **Biomass pre-treatment for bioenergy**: Case study 2: Moisture, physical property, ash and density management as pre-treatment practices in Canadian forest biomass supply chains. [S.l]: IEA Bioenergy, 2018. 83 p. Disponível em: <https://itp-fuel-treatment.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/15/2018/09/CS2-Forest-biomass-pre-treatment.pdf>. Acesso em 25 jan. 2023.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SILVA, L. F. .; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of Eucalyptus and Corymbia logs. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 2, p. 335-344, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A redução do consumo de combustíveis fósseis na geração de energia coloca como destaque a biomassa lenhosa de plantações florestais como uma fonte alternativa renovável. A valorização dos resíduos da indústria de base florestal vem ao encontro do conceito de biorrefinarias, que busca a integração de processos e soluções industriais a fim de produzir novos bioprodutos e biocombustíveis.

No capítulo 1, o estudo da transição energética de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis na indústria mostrou que a substituição do gás natural por cavacos de madeira na cogeração de energia elétrica em indústria de painéis de madeira foi viável economicamente mesmo com uma elevada taxa mínima de atratividade e alto investimento industrial.

Já no capítulo 2, considerando o aumento dos preços dos cavacos de madeira nos últimos anos, foi investigada a utilização de resíduos de processos produtivos da indústria de painéis de madeira na forma de briquetes. O resíduo densificado além de aumentar significativamente a densidade energética, propiciou o transporte por longas distâncias (500 km) até a fonte consumidora a um custo acessível. A solução encontrada apareceu como uma opção para complementar o consumo de cavacos de madeira em caldeiras industriais no mercado florestal.

Como continuação deste estudo, para as novas rotas tecnológicas estudadas, sugere-se realizar o balanço das emissões de gases de efeito estufa, já que a valorização dos resíduos tem potencial para comprovar a adicionalidade em projetos para geração de créditos de carbono no combate as mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ACUNA, M.; MIROWSKI, L.; GHAFARIYAN, M. R.; BROWN, M. Optimising transport efficiency and costs in Australian wood chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, n. 2, p. 291-300, 2012.
- ALMEIDA, A. N.; SILVA, J. C. G. L.; ANGELO, H. Influência da Klabin no mercado de madeira em tora do Estado do Paraná. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 153-158, 2012.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Quantidade de usinas termelétricas por tipo. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- ANTAR, M.; LYU, D.; NAZARI, M.; SHAH, A.; SHOU, X.; SMITH, D. Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, 2021.
- ASHKANANI, H. E.; WANG, R.; SHI, W.; SIEFERT, N. S.; THOMPSON, R. L.; SMITH, K.; STECKEL, J. A.; GAMWO, I. K.; HOPKINSON, D.; RESNIK, K.; MORSI, B. I. Effect of Power Plant Capacity on the CAPEX, OPEX, and LCOC of the CO₂ Capture Process in Pre-Combustion Applications. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 109, 2021.
- AVEN, T. **Foundations of Risk Analysis**. 2 ed. United Kingdom: John Wiley and Sons, 2012. 211 p.
- AVEN, T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 1, p. 1-13, 2016.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO-FILHO, M. T.; CHAGAS, M. P.; DIAS, C. T. S. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Árvore**, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008.
- BENAMI, E.; JIN, Z.; CARTER, M. R.; GHOSH, A.; HIJMANS, R. J.; HOBBS, A.; KENDUIYWO, B.; LOBELL, D. B. Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, p. 140-159, 2021.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

BRAGHIROLI, F. L.; PASSARINI, L. Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. **Current Forestry Reports**, v. 6, p. 172-183, 2020.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2581-2588, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa energética. **Balanco Energético Nacional 2022: Relatório Síntese**, ano base 2021. [Rio de Janeiro]: EPE, 2022. 66 p.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; MARCUS, A. **Fundamentals of Corporate Finance**. 10 ed. New York: McGraw-Hill. 2019. 723 p.

CAMPBELL, R. M.; ANDERSON, N. M.; DAUGAARD, D. E.; NAUGHTON, H. T. Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. **Applied Energy**, v. 230, p. 330-343, 2018.

COLLARES, B. B.; FONTOURA JÚNIOR, J. A. S.; RIBEIRO, C. M.; NABINGER, C.; LAMPERT, V. N. Análise comparativa do lucro e risco de sistemas agropecuários na campanha gaúcha. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 90981-90997, 2020.

CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F.; VALE, A. T.; CHAVES, B. S. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus s p.*, *T. vulgaris* e *P. lecointei*. In: OLIVEIRA, R. J.; MOREIRA, R. C. **Recursos naturais: energia de biomassa florestal**. Guarujá: Científica Digital, 2021. p. 49-61.

DELUCIS, R. A.; SANTOS, P. S. B.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A. Chemical and fuel properties of forestry wastes from pine plantations. **Árvore**, v. 41, n. 5, 2017.

DENADAI, M. S. **Caracterização e avaliação da umidade em fardos de palhiço de cana-de-açúcar e economicidade de processos de recolhimento**. 2018. 68f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2018.

ESPERANCINI, M. S. T. **Avaliação econômica de sistemas de sucessão de culturas sob condições de risco no estado de São Paulo, 2005**. 2006. 87 p. Tese (Livre Docência de Métodos Aplicados à Gestão Agrícola) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2006.

EUFRADE-JUNIOR, H. J. **Predição e controle da umidade da madeira para otimização da cadeia produtiva de energia de eucalipto**. 2019. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2019.

EUFRADÉ-JUNIOR, H. J.; SPADIM, E. R.; RODRIGUES, S. A.; DAL-PAI, E.; BALLARIN, A. W.; GUERRA, S. P. Impact of Rainy and Dry Seasons on Eucalypt Fuelwood Quality Logs Stored in Piles: A Case Study in Brazil. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 42, n. 2, p. 291-300, 2021.

FAO. Forestry for a low carbon future: integrating forests and wood products in climate change strategies. **FAO Forestry Paper**, n. 177, 2016, 180 p.

FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá - MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013.

FOELKEL, C. O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor Kraft de cozimento. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, [S.l.], maio 2009. 97 p.

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, 2010.

GENG, A.; YANG, H.; CHEN, J.; HONG, Y. Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 192-200, 2017.

GITMAN, L. J. **Principles of Managerial Finance**. 12 ed. Boston: Addison Wesley. 2008. 847 p.

GONÇALVES, J. C.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, S. P. C.; GOMIDE, L. R. Análise econômica da rotação florestal de povoamentos de eucalipto utilizando a simulação de Monte Carlo. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1339-1347, 2017.

GUERRA, S. P. S.; EUFRADÉ-JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu:FEPAF, 2019. 172 p.

HÖLTINGER, S.; SCHMIDT, J.; SCHÖNHART, M.; SCHMID, E. A spatially explicit techno-economic assessment of green biorefinery concepts. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 3, p. 325-341, 2014.

IBÁ. **2021**: relatório anual Ibá. São Paulo: IBÁ, 2021. 176 p.

IBÁ. **Ibá**: Relatório anual 2022. São Paulo: IBÁ, 2022. 87 p.

IBÁ. **Relatório 2017**. São Paulo: IBÁ, 2017. 77 p.

IWAKIRI, S. **Painéis de fibras de madeira**. Notas de aula, UFPR, 22 p., 2023a. Acesso em: 27 jan 2023. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinassuo/setsuo-pfm.pdf>.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira aglomerada**. Notas de aula, UFPR, 39 p., 2023b. Acesso em: 27 jan 2023. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinassuo/setsuo-pfm.pdf>.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, IAN. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v. 85, p. 371-386, 2016.

KROOK, J.; MÅRTENSSON, A.; EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, n. 2, p. 158-166, 2006.

KUMAR, A.; ADAMOPOULOS, S.; JONES, D.; AMIANDAMHEN, S. O. Forest Biomass Availability and Utilization Potential in Sweden: A Review. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 65-80, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00947-0>

LI, Q.; GUIPING, H. Techno-economic analysis of biofuel production considering logistic configurations. **Bioresource Technology**, v. 206, p. 195-203, 2016.

LO, S. L. Y.; HOW, B. S.; LEONG, W. D.; TENG, S. Y.; RHAMDHANI, M. A.; SUNARSO, J. Techno-economic analysis for biomass supply chain: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, 2021.

LONDO, M.; VAN STRALEN, J.; USLU, A.; MOZAFFARIAN, H.; KRAAN, C. Lignocellulosic biomass for chemicals and energy: an integrated assessment of future EU market sizes, feedstock availability impacts, synergy and competition effects, and path dependencies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 12, p. 1065-1081, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1926>.

MAQHUZU, A. B.; YOSHIKAWA, K.; TAKAHASHI, F. Biofuels from agricultural biomass in Zimbabwe: Feedstock availability and energy potential. **Energy Procedia**, v. 142, p. 111-116, 2017.

MOLIN FILHO, R. A. D. **Viabilidade de queima da casca de eucalipto em fornos de cimento**. 2020. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

MOTTA, R.; COSTA, R. P.; NEVES, C.; CALÔBA, G.; GONÇALVES, A.; NAKAGAWA, M. **Engenharia Econômica e Finanças**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 312 p.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba-MG**. 2005. 94f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels: significance and impact. **Biomass Bioenergy**, v. 30, 973-982, 2006.

OLIVEIRA, D. L.; BRANDAO, L. E.; IGREJAS, R.; GOMES, L. L. Switching outputs in a bioenergy cogeneration project: A real options approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 74-82, 2014.

PALISADE. **@Risk**: probabilistic risk analysis in Excel. Raleigh, EUA. 2023. Disponível em: <https://www.palisade.com/risk/>. Acesso em: 23 jan 2023.

PEREIRA, I. Z.; SANTOS, I. F. S.; SILVA, H. L. C.; BARROS, R. M. Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira Brasil com enfoque no potencial de geração de energia. **Revista Brasileira de Energia**, v. 25, n. 2, 2019.

POPP, J.; KOVÁCS, S.; OLÁH, J.; DIVÉKI, Z.; BALÁZS, E. Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. **New Biotechnology**, v. 60, p. 76-84, 2021.

PREILIPPER, U. E. M.; DALFOVO, W. C. T.; ZAPPAROLI, I. D.; MAROUBO, L. A.; MAINARDES E. L. Aproveitamento do resíduo madeireiro na produção de energia termoeletrica no município de Marcelândia-MT. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 36, p. 411-428, 2016.

RABE, M.; STREIMIKIENE, D.; BILAN, Y. The concept of risk and possibilities of application of mathematical methods in supporting decision making for sustainable energy development. **Sustainability**, v. 11, n. 4, 1018, 2019.

ROMANÍ, A.; LARRAMENDI, A.; YÁÑEZ, R.; CANCELA, Á.; SÁNCHEZ, Á.; TEIXEIRA, J. A.; DOMINGUES, L. Valorization of Eucalyptus nitens bark by organosolv pretreatment for the production of advanced biofuels. **Industrial Crops & Products**, v. 132, p. 327-335, 2019.

SANQUETTA, C. R.; SANTANA, G. M.; SANQUETTA, M. N. I.; OLIVEIRA, T. W. G.; CORTE, A. P. Produção, importação, exportação e consumo aparente de painéis de madeira no Brasil entre 1961 e 2016. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 44-49, 2020.

SANTOS, A. M. **Caracterização química da biomassa: potencial da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração**. 2018. 63f. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018.

SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 499-507, 2005.

SHUKLA, P.R.; SKEA, J.; SLADE, R.; KHOURDAJIE, A. A.; DIEMEN, R. V.; MCCOLLUM, D.; PATHAK, M.; SOME, S.; VYAS, P.; FRADERA, R.; BELKACEMI, M.; HASIJA, A.; LISBOA, G.; LUZ, S.; MALLEY, J. (Eds.). IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of working group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 2029 p. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/2929481A59B59C57C743A79420A2F9FF/9781009157933AR.pdf/Climate_Change_2022_-_Mitigation_of_Climate_Change.pdf?event-type=FTLA. Acesso em: 09 jan. 2022.

SOCOL, F. J.; PEREIRA, A. L.; CELESTE, W. C.; COURA, D. J.; Chaves, G. L. D. Desafios para implementação da geração distribuída de energia no Brasil: uma revisão integrativa da literatura. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 2, n. 3, p. 31-43, 2016.

SOSA, A.; ACUNA, M.; MCDONNELL, K.; DEVLIN, G. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. **Applied Energy**, v. 137, p. 338-351, 2015.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

SUGIYAMA, S. Monte Carlo simulation/risk analysis on a spreadsheet: review of three software packages. **Foresight**, n. 9, p. 36-42, 2008.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

THIFFAULT, E.; GIANVENUTI, A.; ZUZHANG, X.; WALTER, S. **The role of wood residues in the transition to sustainable bioenergy**: Analysis of good practices and recommendations for the deployment of wood residues for energy. Rome: FAO, 2023, 87 p. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3826en>. Acesso em 25 jan 2023.

THIFFAULT, E.; SOKHANSANJ, S.; EBADIAN, M.; REZAEI, H.; OVEISI, E.; GHIASI, B.; YAZDANPANAH, F.; ASIKAINEN, A.; ROUTA, J. Biomass pre-treatment for bioenergy: Case study 2: Moisture, physical property, ash and density management as pre-treatment practices in Canadian forest biomass supply chains. [S.l]: IEA Bioenergy, 2018. 83 p. Disponível em: <https://itp-fuel-treatment.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/15/2018/09/CS2-Forest-biomass-pre-treatment.pdf>. Acesso em 25 jan. 2023.

TRØMBORG, E.; HAVSKJOLD, M.; LISLEBØ, O.; RØRSTAD, P. K. Projecting demand and supply of forest biomass for heating in Norway. **Energy Policy**, v. 39, p. 7049-7058, 2011.

YILMAZ, S.; SELIM, H. A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 420-430, 2013.

ZAHRAEE, S. M.; SHIWAKOTI, N.; STASINOPOULOS, P. Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, 2020.

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 117-127, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.058>.

CAPUTO, A. C.; PALUMBO, M.; PELAGAGGE, P. M.; SCACCHIA, F. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 1, p. 35-51, jan. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009>.

COLLE, D. A. T, ZUCCHI, C.; CASAROTTO, G.; SEHNEM, S. Viabilidade de implantação de uma caldeira para cogeração de energia a partir da biomassa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 60, 12 maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v5e1201660-91>.

SILVA, A. C. M. R. **Correlações de eficiência energética em função da potência de termelétricas a biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

UPADHYAY, T. P.; SHAHI, C.; LEITCH, M.; PULKKI, R. Economic feasibility of biomass gasification for power generation in three selected communities of northwestern Ontario, Canada. **Energy Policy**, v. 44, p. 235-244, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.047>.