



Análise de pré-viabilidade técnico-econômica da produção de pellets de madeira no Brasil

Alicia Alves Courbassier Santos

Projeto de Final de Curso

Orientadora

Prof. Flávia Chaves Alves

Agosto de 2022

Análise de pré-viabilidade técnico-econômica da produção de pellets de madeira no Brasil

Alicia Alves Courbassier Santos

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira Química.

Aprovado por:

Fábio de Almeida Oroski, D. Sc.

Carlos Corrêa, M. Sc.

Orientado por:

Flávia Chaves Alves, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Agosto de 2022

Santos, Alícia Alves Courbassier

Análise de pré-viabilidade técnico-econômica da produção de pellets de madeira no Brasil / Alícia Alves Courbassier Santos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

xi, 109 p.; il.

Projeto Final – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadora: Flávia Chaves Alves.

1. Pellets de madeira. 2. Biomassa. 3. Biocombustível. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Flávia Chaves Alves. I. Análise de pré-viabilidade técnico-econômica da produção de pellets de madeira no Brasil

“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez”

Jean Cocteau

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as graças em minha vida, por me guiar sempre ao meu propósito.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Andréa Silva Alves e Alessandro Courbassier Santos, por terem me ensinado o valor incomparável do conhecimento, por terem me proporcionado todas as condições para que eu seguisse minha trajetória acadêmica. Estendo esse agradecimento à toda minha família, que sempre comemorou minhas conquistas e vibrou comigo. Essa será mais uma de nossas vitórias.

Agradeço também aos meus amigos, por serem um afago nos momentos de desânimo e estresse. Guardo nossos momentos de leveza e descontração com muito carinho.

Agradeço ao meu namorado, Marcos Raul Augusto, por ser meu parceiro em todos os momentos e compartilhar a vida comigo.

Finalizo agradecendo àqueles que se doam diariamente à profissão de compartilhar conhecimento. Sou extremamente grata a todos os professores que cruzaram meu caminho e me tornaram uma pessoa melhor com cada ensinamento. Em especial, deixo meu muito obrigada a professora Flávia Chaves Alves por toda paciência, suporte e dedicação neste trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Análise de pré-viabilidade técnico-econômica da produção de pellets de madeira no Brasil

Alícia Alves Courbassier Santos

Agosto, 2022.

Orientadora: Prof. Flávia Chaves Alves, D. Sc.

As consequências ao meio ambiente geradas pelo uso de combustíveis fósseis estão afetando progressivamente a vida no planeta. A preocupação sobre o futuro desta realidade tem aumentado os esforços para incrementar o uso de energias limpas capazes de reduzir as emissões de gases nocivos aos seres humanos. Os pellets de madeira apresentam-se nessa conjuntura como alternativa aos combustíveis de origem fóssil, sendo produzidos a partir de biomassa lignocelulósica. Por meio de um processo de fabricação essencialmente mecânico, realizado em poucas etapas, com baixa complexidade tecnológica, os pellets de madeira são produzidos e adquirem maior densidade energética quando comparados a outros biocombustíveis, baixo teor de umidade, alto teor de voláteis e geometria regular. Essas características, associadas à facilidade de armazenamento, manuseio e transporte, tornam esse produto competitivo no mercado. Tendo em vista o seu recente surgimento no mercado de energia, seu potencial de crescimento observado nos últimos 10 anos projeta seguir essa tendência pelos próximos períodos. No Brasil, as características do clima e relevo propiciam vantagens na geração de receita a partir de florestas plantadas. Dessa forma, o presente trabalho utilizou dados da literatura, baseados no modelo de Pirraglia et al. (2010), para avaliar a viabilidade econômica da construção de uma planta com capacidade de produção de 75.000t de pellets de madeira por ano no Brasil. O fluxo de caixa foi construído a partir de estimativas de investimento e gastos operacionais para o cenário base. O ponto de nivelamento de caixa mostrou a eficiência do processo. Os resultados das métricas de valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback* descontado indicaram viabilidade econômica crítica para o projeto. Análises de sensibilidade foram realizadas a fim de identificar os limites de viabilidade do projeto, bem como gargalos para a implementação da planta. A partir dos resultados, foi possível identificar possíveis estratégias de redução de custos não consideradas no cenário base. Em posse de todos os aspectos, foi possível identificar que, apesar da produção de pellets de madeira no Brasil para a comercialização interna mostrar-se interessante para ampliação do uso de renováveis na matriz energética, alguns desafios econômicos ainda precisam ser contornados para que o produto possua maior probabilidade de gerar retornos atrativos aos investidores.

ÍNDICE

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Evolução histórica do uso de combustíveis para geração de energia.....	4
2.1.1 Mundo.....	4
2.2.2 Brasil.....	7
2.2 Acordos para redução de emissão de gases do efeito estufa	10
2.3 Como a pandemia do Coronavírus influenciou nos planos energéticos dos governos 15	
2.4 Biomassa	17
2.4.1 Definição	17
2.4.2 Classificação.....	20
2.4.2.1 Biomassa Florestal.....	20
2.4.2.2 Biomassa Agrícola.....	20
2.4.2.3 Resíduos Urbanos e Industriais	20
2.4.3 Uso de Biomassa	21
2.4.3.1 Mundo.....	21
2.4.3.2 Brasil.....	22
2.5 Pellets de Madeira - Caracterização do produto.....	26
2.5.1 Descrição físico química do produto	26
2.5.2 Conversão do produto em energia	31
2.5.3 Normas aplicadas.....	33
2.5.4 Pellets de madeira no contexto da transição energética	38
2.5.5 Estudos futuros – Pellet Torrefado	39
2.6 Pellets de Madeira – Produção	40
2.6.1 Fluxograma de processo	40
2.6.2 Produção mundial	43
2.6.3 Produção brasileira	46
2.7 Pellets de Madeira - Distribuição	47
2.7.1 Armazenagem.....	47
2.7.2 Transporte.....	48
2.7.3 Fluxo de distribuição mundial	49

3	Metodologia	51
3.1	Localização do projeto	51
3.2	Investimento	52
3.2.1	Investimento fixo	52
3.2.2	Ajustes de estimativa	54
3.2.2.1	Fator de extrapolação	55
3.2.2.2	Fator de atualização no tempo	55
3.2.2.3	Fator de conversão da moeda	56
3.2.2.4	Fator de nacionalização	56
3.2.3	Capital de giro	57
3.3	Custos de produção	57
3.3.1	Custos variáveis	57
3.3.2	Custos fixos	59
3.4	Preço médio de venda do produto	62
3.5	Despesas operacionais	63
3.6	Demonstrativo de Resultados de Exercício, Fluxo de Caixa e Valor Presente Líquido 64	
3.7	Taxa Interna de Retorno	66
3.8	<i>Payback</i> descontado	66
3.9	Ponto de nivelamento de caixa	67
3.10	Análise de sensibilidade	68
4	Resultados e Discussões	69
4.1	Localização do projeto	69
4.2	Cenário base do projeto	71
4.3	Investimento total	72
4.4	Custo de produção	73
4.5	Preço médio de venda do produto	76
4.6	Despesas operacionais	76
4.7	Ponto de nivelamento de caixa	77
4.8	VPL, TIR e <i>Payback</i> descontado	77
4.9	Análise de sensibilidade	78
4.9.1	Sensibilidade: Custo variável unitário	78
4.9.1.1	Sensibilidade: Custo de aquisição da madeira úmida	79
4.9.1.2	Sensibilidade: Custo de aquisição da eletricidade	80
4.9.2	Sensibilidade: Preço médio de venda do produto	83

4.9.3	Sensibilidade: Investimento fixo	85
5	Conclusões	88
	Referências bibliográficas.....	92
	Apêndice A.....	109
	Apêndice B.....	109
	Apêndice C.....	110
	Apêndice D.....	111
	Apêndice E.....	111
	Apêndice F.....	112
	Apêndice G.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira 2020.....	9
Figura 2: Consumo x fonte de energia	10
Figura 3: Emissões de CO2 devido a geração de energia por combustão e por processos industriais	11
Figura 4: Cenários de emissões 2000-2100.....	12
Figura 5: Comparação das consequências entre 1,5 °C e 2°C de aumento na temperatura mundial.....	13
Figura 6: Possíveis trajetórias das emissões de CO2 até 2100.....	15
Figura 7: Estrutura da biomassa lignocelulósica.....	18
Figura 8: Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa	19
Figura 9: Participação regional no valor da produção florestal (%)	23
Figura 10: Distribuição dos grupos dos produtos florestais no valor da produção da silvicultura (%).....	24
Figura 11: Pellets de madeira	26
Figura 12: Fluxograma simplificado do processo de peletização	40
Figura 13: Matriz peletizadora	42
Figura 14: Evolução global da produção de pellets de madeira no mundo em milhões de toneladas.....	43
Figura 15: Distribuição da produção mundial de pellets de madeira em 2020 em %	44
Figura 16: Volume ocupado (m ³) por poder calorífico (MWh) por combustível	47
Figura 17: Distribuição da produção mundial de pellets de madeira em 2020 em %	49
Figura 18: Distribuição percentual do custo variável unitário	79
Figura 19: Variações no custo de aquisição da madeira (%) x TRI (%).....	80
Figura 20: Variações no custo de aquisição da eletricidade (%) x TRI (%)	81
Figura 21: Variações nas parcelas dos custos variáveis (%) x TRI (%)	83
Figura 22: Variações no preço de venda dos pellets de madeira (%) x TRI (%).....	85
Figura 23: Variações na estimativa de investimento fixo (%) x TRI (%).....	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Geração de eletricidade a partir de biomassa	22
Tabela 2: Consumo energético para disponibilização dos resíduos agrícolas	25
Tabela 3: Características químicas dos pellets de madeira	27
Tabela 4: Características físicas dos pellets de madeira	29
Tabela 5: Propriedades dos combustíveis fósseis e biocombustíveis	33
Tabela 6: Limites dos parâmetros para cada classe de pellet de madeira	36
Tabela 7: Tipos de matéria prima por classe de pellet de madeira	37
Tabela 8: Estimativa da formação de custos desembolsáveis	60
Tabela 9: Distribuição do percentual de depreciação MACRS-7	61
Tabela 10: Distribuição do percentual de depreciação MACRS-10	62
Tabela 11: Cálculos de massa (t) por corrente do processo	71
Tabela 12: Estimativas de investimento	73
Tabela 13: Custo variável.....	74
Tabela 14: Formação dos custos desembolsáveis	74
Tabela 15: Cálculo do CTP	74
Tabela 16: Custo fixo desembolsável.....	75
Tabela 17: Depreciação em cada ano do projeto.....	76
Tabela 18: Despesas operacionais.....	77
Tabela 19: Ponto de nivelamento de caixa.....	77

1. Introdução

A energia é um recurso fundamental para o desenvolvimento humano, de forma que a construção e evolução da matriz energética reflete as características da sociedade. O modelo baseado em fontes fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, possibilitou diversos avanços técnicos e econômicos (MELLO, 2001). Apesar disso, o esgotamento progressivo desses combustíveis e os danos causados pelos balanços não favoráveis de emissões de gases poluentes durante o processo de geração de energia são alertas econômicos e ambientais discutidos nas agendas mundiais (SACHS, 2005). O uso de fontes alternativas em substituição aos combustíveis fósseis possui papel substancial no combate das questões citadas, sendo a bioenergia – gerada a partir de biomassa, isto é, matéria orgânica *in natura* ou processada – uma dessas opções. (ECYCLE, 2021).

O presente trabalho tem como foco o pellet de madeira - combustível sólido alternativo derivado de biomassa florestal. Esse produto é obtido pelo processamento da madeira ou de seus resíduos por adensamento tornando-o constituído de baixa umidade e alta densidade energética, adquirindo formato cilíndrico (GARCIA et al., 2016a). A conversão da energia química de elementos, principalmente celulose, presentes na madeira, em térmica por meio da reação de combustão direta com oxigênio ocorre em fornos e caldeiras. O calor gerado pode ser utilizado diretamente para aquecimento ou para alimentação de turbinas a vapor, gerando energia elétrica (ANEEL, 2008).

A queima de material orgânico por combustão direta é um dos processos de aquecimento mais antigos utilizados na evolução humana. Apesar da facilidade associada, baixas eficiências são historicamente observadas. Isso porque, apesar da queima do combustível não requerer maquinários muito complexos, um elevado aproveitamento do calor gerado é um desafio tecnológico. Com o aprimoramento das tecnologias empregadas industrialmente, equipamentos que visam uma elevada eficiência energética vêm sendo desenvolvidos, impulsionando o uso de bioenergia para a geração de eletricidade, tornando-as competitivas no mercado (ANEEL, 2008; TROMBORG et al., 2013).

Sendo uma fonte de energia de baixo carbono, o pellet de madeira é uma opção para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GEE)¹. A substituição de combustíveis sólidos fósseis, como o carvão mineral, por pellets de madeira é uma estratégia que está sendo cada vez mais utilizada para atender às metas do Acordo de Paris. A produção cresceu de pouco mais de 15 milhões de toneladas em 2010 para quase 42 milhões em 2020 (BIOENERGY EUROPE PELLETS STATISTIC REPORT, 2021), transitando da posição limitada em um mercado regional na Escandinávia e Áustria para uma *commodity* negociada por atores internacionais (HEINIMO; JUNGINGER, 2009; LAMERS et al., 2012a).

Esse crescimento acelerado foi acompanhado do desenvolvimento de normas de qualidade. Inicialmente, cada país tinha sua norma nacional e comercializava seus produtos internamente. Com o crescimento da comercialização, uma norma internacional chamada ENplus® foi desenvolvida e adotada por grande parte do mercado, certificando toda a cadeia de fornecimento (EUROPEAN PELLET COUNCIL, 2013).

Cerca de 50% do consumo de pellets de madeira no mundo em 2020 ocorreu na Europa e a expectativa, segundo o relatório *Wood Pellet Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027)*, é de 30 a 40% de aumento até 2027. O suprimento desse combustível nesses países é dado principalmente por produção interna e importação da América do Norte e Ásia. Embora o continente europeu permaneça como maior produtor, desde 2016 a demanda de consumo cresce mais rápido que a produção (BIOENERGY EUROPE PELLETS STATISTIC REPORT, 2021).

No Brasil, devido às condições edafoclimáticas², o setor primário se destaca na economia, com o agronegócio representando 27,4% do PIB em 2021 (CEPEA, 2022). Sendo um dos dez maiores produtores de papel e celulose, além de uma alta produção de painéis compensados, o país possui domínio da indústria madeireira (IBÁ, 2021). O Brasil possui 9,3 milhões de hectares de áreas plantadas com espécies florestais comerciais e é beneficiado com uma das maiores taxas de crescimento florestal, quando comparado a outros países. Além disso, cerca de 30 milhões de toneladas de resíduos da indústria madeireira são gerados anualmente (BIOMASSA BR, 2016).

¹ Dióxidos de carbono (CO₂) e de nitrogênio (N₂O), metano (CH₄) e os três gases flúor (HFC, PFC, SF₆) (PROCLIMA, 2022).

² Características do meio ambiente.

Diante dessas vantagens estratégicas, acompanhando as tendências globais, a produção brasileira de pellets de madeira está crescendo rapidamente. O volume produzido obteve um aumento de 57.000 toneladas em 2012 para 1.030.000 em 2020, um valor recorde desde os primeiros registros de produção comercial desse biocombustível sólido em 2000. Apesar desse crescimento, o país ainda é pouco representativo no mercado, respondendo por apenas 2,45% da produção mundial (Garcia et al., 2016b); BIOENERGY EUROPE PELLETS STATISTIC REPORT, 2021).

Segundo estudos realizados por Quenó (2015), os principais desafios estão ligados a viabilidade econômica e exigências socioambientais. A ausência de chuvas verificadas nos últimos anos, reduzindo a produtividade das hidroelétricas, associado à demanda ambiental para substituição de combustível das termelétricas a carvão, são contextos que podem beneficiar projetos de produção de pellets de madeira no Brasil. Além disso, o país também pode aumentar sua atuação na exportação para o mercado europeu, que permite preços de venda mais altos devido à comercialização de créditos de carbono que são obtidos com a utilização de renováveis.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação preliminar da viabilidade técnico-econômica para a instalação de uma planta industrial para produção de pellets de madeira no Brasil, com foco no mercado interno.

Para atingir esse objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e analisar as condições de produção, distribuição e utilização dos pellets da madeira no mundo e no Brasil;
- Buscar dados atualizados acerca dos gastos operacionais e investimentos necessários a produção brasileira de pellets de madeira a partir de madeira originada de florestas plantadas, para o desenvolvimento de plantas;
- A partir de uma análise de sensibilidade, evidenciar quais os principais desafios para que o Brasil avance em sua participação no mercado de pellets de madeira.

2. Revisão Bibliográfica

Com o propósito de construir uma fundamentação teórica que motivou o desenvolvimento deste trabalho, neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados à produção de pellets de madeira no Brasil. O capítulo se inicia com uma abordagem histórica sobre como os combustíveis na geração de energia atuaram na evolução humana, bem como esses hábitos tradicionais alteraram o equilíbrio ambiental. Em seguida, serão apresentados os acordos firmados por instituições governamentais que se comprometem a combater a mudança climática. Sendo o uso de fontes renováveis uma importante ferramenta para a transição energética, o uso de Pellets de Madeira como Biomassa Florestal será evidenciado. Além da descrição do produto, o capítulo irá detalhar características da produção e distribuição do mesmo.

2.1 Evolução histórica do uso de combustíveis para geração de energia

2.1.1 Mundo

Segundo a definição do dicionário *Oxford Languages* (2022), energia é a capacidade que um corpo, uma substância ou um sistema físico tem de realizar trabalho. Ao longo do desenvolvimento socioeconômico da humanidade, observa-se que a geração de energia sempre desempenhou papel fundamental. Desde as formas mais primitivas, como a queima de matéria orgânica para aquecimento, até tecnologias avançadas, como a utilização de nano moléculas, formas de obter energia são objetos de estudo para a evolução humana.

A dinâmica da industrialização possibilitou a diversificação de fontes energéticas, otimizando cada vez mais tarefas e proporcionando confortos em substituição ao trabalho manual (PIERRE, 2011). Os combustíveis surgem nessa conjuntura como substâncias que ao passarem por reações de combustão, liberam calor como produto (EPE, 2022). Para a sua produção, o aprimoramento da matemática, geometria e engenharia, atua em constante progresso marcado por quatro revoluções industriais e um futuro progressivamente tecnológico (DIAS, 2018).

Durante a segunda metade do século XVIII, registros históricos indicam que a Europa iniciou um movimento de transição do trabalho artesanal para o assalariado por meio da introdução do uso de máquinas. Tais equipamentos produziam vapor por meio

da queima de carvão mineral e eram utilizados nas indústrias, destacando-se a produção de ferro, e em meios de transporte, principalmente ferroviário. Sendo esse combustível gerado a partir da decomposição ao longo dos anos de restos animais ou vegetais, em camada mais profundas da terra, ele é classificado como combustível fóssil. Em dimensões numéricas, a produção de carvão foi impulsionada de 15 milhões de toneladas em 1800 para 132 milhões em 1860 e 701 milhões em 1900, representando um crescimento expressivo de 4573% em 100 anos. (BRANCO, 2014a; SANTOS, 2019; CIPOLLA, 1977)

Uma segunda revolução industrial foi identificada no início de 1900 pelo avanço das indústrias química, elétrica e de aço, a partir do maior domínio sobre o petróleo no mundo. Apesar de registros históricos apontarem para o descobrimento desse produto anos antes de Cristo, apenas em 1850 houve a primeira base para seu refino. Em paralelo ocorreu o desenvolvimento dos motores de combustão interna. Vantagens sobre o carvão mineral foram identificadas, dada a maior densidade energética de seus produtos refinados, mas a hegemonia do primeiro ainda perdurou durante quase todo o século devido à maior competitividade dos preços e o tempo necessário para a descoberta e operacionalização de novos poços de petróleo. (NEIVA, 1966; CIPOLLA, 1977).

A produção em massa e padronizada, permitiu o aumento de escala, que acompanhou o crescimento populacional na época. Para atender as demandas das populações, a eletricidade na comunicação, iluminação, transporte e metalurgia foi essencial. Ainda que os primeiros registros de conversão de energia mecânica em elétrica tenham ocorrido no início do século XVIII, as aplicações em materiais, geração e distribuição só permitiram a formação da indústria elétrica em 1880. (LANDES, 1979)

Por fim, mas não menos importante, a indústria de aço também marcou a segunda revolução industrial. O foco no desenvolvimento de um material estrutural que suportasse maiores temperaturas, favorecendo os processos de combustão, permitiu o barateamento do mesmo, dando espaço para a substituição do ferro nas ferrovias, construção e nos armamentos. (LANDES, 1979). Como consequência, novos elementos na metalurgia foram introduzidos gerando ligas metálicas com diferentes aplicações. (HOBSBAWM, 1979)

A terceira revolução industrial representou o surgimento da era digital e reação da comunidade acadêmica frente à crise do petróleo. A substituição de sinais analógicos por

digitais esteve associada à criação de computadores e da rede de internet. Muitas máquinas foram automatizadas, adquirindo novas funções e aumentando a eficiência, quando comparadas às tradicionais (SANTOS, 2019). Em paralelo, a crise do petróleo desencadeou novos paradigmas sobre a dependência energética pelas fontes fósseis.

É inquestionável que após quase dois séculos de descobrimento sobre o refino do petróleo, muito foi estudado sobre essa fonte energética e seus derivados. A contínua redução de perdas de rendimento ao longo da cadeia produtiva resulta hoje em equipamentos a base de óleo combustível e gás natural com elevada eficiência (ESFERA ENERGIA, 2021). Além disso, toda a infraestrutura de construção e manutenção de plantas industriais a base desses combustíveis possui um elevado índice de geração de empregos ao redor do mundo (EPE, 2022).

Apesar dessas vantagens, segundo Rifkin (2021), há uma relação intrínseca entre o crescimento econômico e a alta nos preços do petróleo. No século 20, foi constatado que a cada 3,5 barris de petróleo produzidos, apenas 1 era gerado, um gargalo que eclodiu na crise de 2007. Durante esse período, o pico da globalização expôs o limite de um sistema econômico dependente dessa fonte de energia finita, frente ao crescimento populacional.

Nessa conjuntura, alternativas utilizando fontes renováveis foram evidenciadas. As energias advindas de fontes solar, nuclear, eólica e de matéria orgânica surgiram como alternativa à dependência de fontes fósseis (SANTOS, 2019). Não apenas a questão econômica foi salientada como problema, mas também a questão ambiental. Isso porque, segundo contas realizadas por Schaeffer e Nogueira (2009), cada barril de petróleo queimado emite entre 420 e 440 quilos de gás carbônico, sem considerar a quantidade emitida ao longo da cadeia produtiva, na extração, processamento, transporte, refino e distribuição.

Alguns autores, como Schwab (2017), presidente do Fórum Econômico Mundial, defendem a existência de uma quarta revolução industrial mais recente, associada principalmente à robotização, armazenamento de informações na nuvem³, *big data*⁴ e

³ Serviço de armazenamento de dados na Internet por provedor de computação sem demanda de espaço físico (AWS, 2022).

⁴ Termo de tecnologia de informação que se refere a conjuntos de dados de grande capacidade, com principais conceitos ligados a velocidade, volume e variedade (CETAX, 2022).

inteligência artificial⁵. Ela surge inicialmente com o objetivo de aumentar a produtividade e gerar conhecimento através de novas tecnologias e análises de dados. A automatização focada na melhoria contínua de processos evita desperdícios e agrega valor a cada uma das etapas produtivas (MAROSTICA, 2021).

Sendo assim, a produção de energia elétrica ganha destaque nos estudos sobre incremento de eficiência energética e na diversificação de fontes, já que os sistemas elétricos fazem parte da maioria dos bens e serviços de forma indispensável (PATRÍCIO, 2020). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), no intervalo de 2022 a 2024, a demanda por eletricidade deve crescer em média 2,7% ao ano, com 90% desse incremento sendo atendido por energias renováveis, que possuem expectativa de 8% de crescimento no mesmo período. Nesse contexto, uma forte relação com sustentabilidade é identificada no movimento da Indústria 4.0. Isso porque a redução de barreiras na utilização de energias renováveis requer o aperfeiçoamento e barateamento dos equipamentos associados (MAROSTICA, 2021).

2.2.2 Brasil

Quando se avalia a industrialização no Brasil, sabe-se que historicamente ela ocorreu de forma tardia. Enquanto a Europa vivia a fase da primeira revolução industrial, o país ainda era uma colônia portuguesa, onde a produção de bens manufaturados era proibida até 1808. Apenas com a criação da tarifa Alves Branco em 1844, que aumentava a taxa de impostos sobre produtos importados, houve um incentivo para a criação das primeiras fábricas no país baseadas nas plantas europeias já operantes, junto ao desenvolvimento das primeiras ferrovias (FURTADO, 2006; FAUSTO, 2002).

O governo de Getúlio Vargas teve um importante papel na industrialização brasileira, quando o mundo passava pela Segunda Guerra e a política nacional incentivava esse setor. Atividades de extração e transformação foram impulsionadas em grandes indústrias como a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Companhia do Vale do Rio Doce e a Petróleo Brasileiro (PETROBRAS) (FURTADO, 2006; FAUSTO, 2002). Nessa época, o setor energético também sofreu um grande avanço para dar suporte ao crescimento industrial, saindo de uma matriz baseada principalmente em lenha e carvão

⁵ Soluções desenvolvidas a partir de simulações de capacidades humanas de inteligência (EQUIPE TOTVS, 2019).

vegetal para uma mais diversificada, focada, assim como as tendências mundiais, no petróleo (CAMPOS DE ANDRADE, 2010; CAMONA; KASSAI, 2019).

A partir de 1950, o governo brasileiro adotou o setor automobilístico como base para dar prosseguimento ao desenvolvimento industrial. Com uma crescente demanda por combustíveis, principalmente gasolina e diesel, a Petrobras recebeu forte incentivo estatal, obtendo seu auge em 1970, quando, segundo registros, 69% da matriz energética do Brasil tinha o petróleo como fonte (CAMPOS DE ANDRADE, 2010; CAMONA; KASSAI 2019; FGVENERGIA; BP STATISTICAL REVIEW, 2020).

Concomitantemente ao pico de demanda deste combustível no país, o choque do Petróleo exigiu uma busca por alternativas energéticas. Motivados pela crise, um dos exemplos de mudança na matriz energética foi o Programa Nacional do Álcool iniciado pelo governo brasileiro em 1975, que promoveu incentivos fiscais e facilitação de empréstimos tanto para os produtores de cana-de-açúcar, como para as empresas automobilísticas visando o desenvolvimento de carros movidos a álcool. Sendo esse produto classificado como biocombustível, além dos incentivos econômicos, o uso de etanol também foi favorecido pelo balanço energético muito positivo. Segundo Goldemberg (2016), menos energia é gasta para gerar etanol que o mesmo é capaz de produzir durante seu consumo, representando um ganho para o meio ambiente.

Outra fonte renovável presente no país desde o final do século XIX são as usinas hidrelétricas. O elevado potencial brasileiro devido à vasta disponibilidade dessa fonte, junto à viabilidade de construção de reservatórios, fez com que essa energia assumisse papel representativo na matriz elétrica do país (BOCK, 2018). Em 1984 foi instalada a Usina de Itaipu, em parceria com o Paraguai, com 20 unidades, gerando cerca de 14 GWs, energia capaz de abastecer os estados do Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (ITAIPU, 2022).

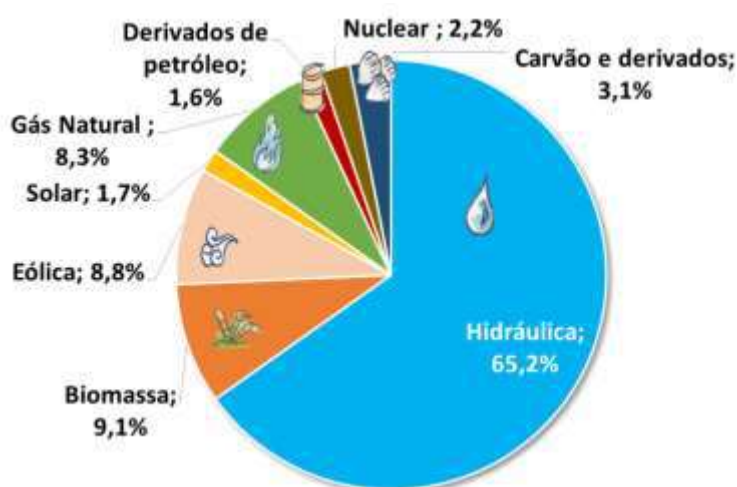
Dez anos depois, outro marco energético ocorreu com a operação da primeira usina de energia eólica na cidade de Gouveia, conectada ao sistema elétrico do país. Apesar do pioneirismo, esse complexo não se encontra mais em funcionamento. Embora a operação dessas usinas esteja limitada às condições dos ventos da região, essa é uma opção vantajosa devido à geração de baixos impactos ambientais. No país, a região que possui maior potencial eólico é o Nordeste, principalmente no estado do Rio Grande do Norte (ABEEÓLICA, 2022).

Em 2011, houve a inauguração da primeira usina fotovoltaica para geração comercial de energia elétrica, no sertão do Ceará. Devido à posição geográfica do Brasil próxima a linha do Equador, a incidência solar é alta quando comparada a outros países, gerando um extenso potencial de produção. Atualmente, ela é encontrada majoritariamente no uso residencial, já que seus painéis voltaicos podem ser instalados em dimensões proporcionais à quantidade de energia desejada para consumo (PORTAL SOLAR, 2022).

O cenário do uso dos diversos tipos de biomassa como combustível sólido na transição energética no Brasil possui um grande facilitador ligado a extensa área de produção agrícola proporcionada pelo clima e relevo. Não apenas as culturas, mas os resíduos delas podem ser aproveitados e transformados em fontes de energia (MARTINI, 2009). Dentre esses produtos, os mais tradicionais são os destinados à queima diretamente para produção de energia elétrica, como cavacos de madeira, e os processados, como pellets de madeira, que passam por etapas de transformação química e/ou física para se tornarem combustíveis. (COUTO et al., 2012).

Todas essas etapas foram construindo a realidade da matriz elétrica do Brasil hoje, onde as fontes renováveis somadas representam 84,8% do total, segundo o relatório mais recente do Balanço Energético Nacional (BEN), divulgado em 2021, indicado na Figura 1. Esse resultado reflete a posição do país com quase três vezes mais consumo de renováveis em comparação com a média mundial, segundo a análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019, conforme observado na Figura 2.

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira 2020



Fonte: BEN, 2021

Figura 2: Consumo x fonte de energia



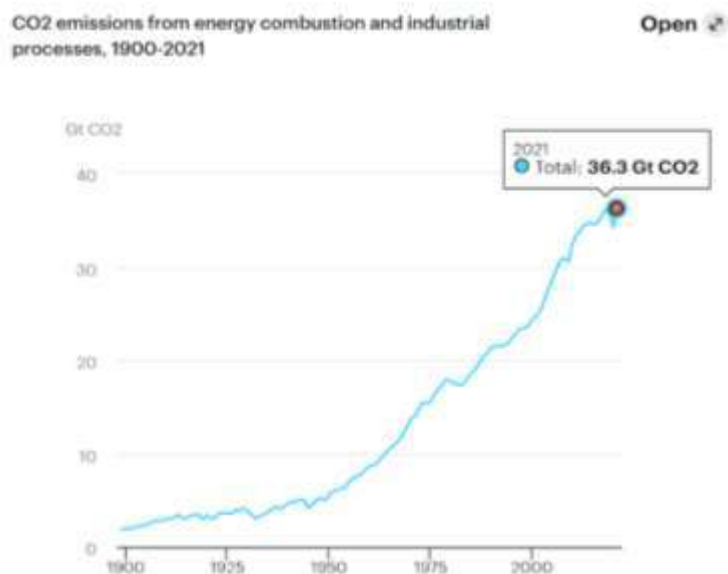
Fonte: EPE, 2019

Apesar desse empenho reconhecido, a forte dependência da energia elétrica com as fontes hídricas expõe uma fragilidade no Brasil. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2021 o país enfrentou a pior crise hídrica em 91 anos, após oito anos seguidos de estação chuvosa abaixo da média, ocasionando baixos volumes nos reservatórios que abastecem as usinas hidrelétricas. Como consequência, usinas termelétricas a carvão mineral foram acionadas para suprir a demanda nacional, aumentando o uso de fonte fóssil e reduzindo o de renovável. Além da questão ambiental, a eletricidade gerada por essas usinas como alternativa possui custo adicional, que foi repassado para os consumidores em 2021 e segue em alta em 2022 (MEDEIROS, 2021). De acordo com o pesquisador Felipe Queiroz da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) para o jornal Correio Braziliense, um investimento estruturado em alternativas de energia limpa é essencial para reduzir a dependência com as usinas hidrelétricas e reduzir os impactos socioambientais diante de crises como a observada em 2021.

2.2 Acordos para redução de emissão de gases do efeito estufa

A forma como o mundo passou pelas revoluções industriais trouxe diversos benefícios para o desenvolvimento socioeconômico, conforme discutido na seção anterior. Entretanto, elas também trouxeram como consequência uma mudança climática em decorrência de um crescimento exponencial da emissão de gás carbônico na atmosfera. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), as emissões saltaram de 1,8 Gt de CO₂ em 1899, para 36,3 Gt em 2021, como é exposto na Figura 3.

Figura 3: Emissões de CO2 devido a geração de energia por combustão e por processos industriais



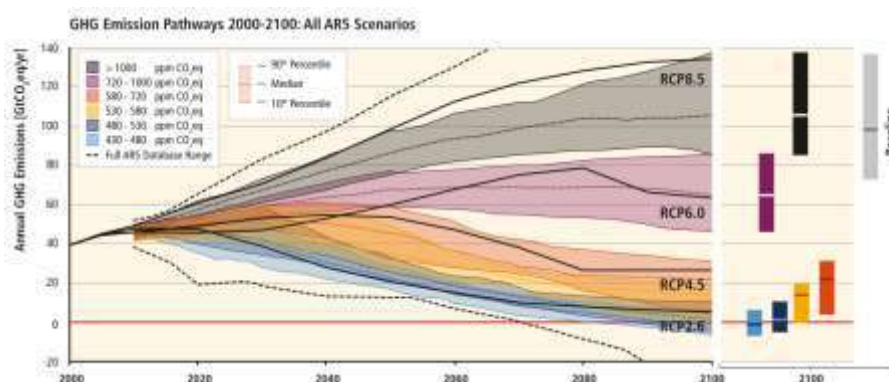
Fonte: IEA, 2022

Para o entendimento entre a relação de causa e consequência do aumento de emissões dos GEE com a mudança climática, é preciso detalhar o chamado Efeito Estufa. Segundo Almeida (2016), “uma parte da irradiância solar refletida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como consequência disso, o calor fica retido, não sendo liberado ao espaço”, configurando o efeito estufa. Este fenômeno é responsável pelo equilíbrio térmico que permite a vida humana na Terra, mas vem sendo perturbado pelos hábitos da humanidade.

A primeira representativa reação a esse desequilíbrio pelas Estados foi a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês), em 1992, que originou os encontros nas chamadas Conferência das Partes (COP, na sigla em inglês). Durante a COP 3, em 1997, o Protocolo de Quioto foi assinado, sendo um acordo que previa a redução de emissões em pelo menos 5% comparado aos níveis da década de 1990. Como a vigência era limitada a um grupo de participantes que representasse pelo menos 55% das emissões globais, o mesmo só entrou em vigor em 2005, com a assinatura da Rússia. Vale ressaltar que alguns países em desenvolvimento, como o Brasil, entraram no acordo de forma voluntária e não possuíam metas preestabelecidas (UNFCCC, 1997).

Alguns anos após esse primeiro acordo, estudos do IPCC (2014) apresentaram as possíveis trajetórias do clima a partir de 2010 até 2100 (*Representative Concentration Pathway*), apontando quatro cenários climáticos mais prováveis caso as nações mantivessem seus padrões de emissões: RPC 2.6, RPC 4.5, RPC 6.0, RPC 8.5. O primeiro cenário representa o aumento de 1,5 a 2°C, seguido por 2,5 a 3°C, 3 a 3,5°C e o mais crítico acima de 5°C. Esses cenários estão apresentados na Figura 4. Segundo esse mesmo estudo, o aumento acima de 2°C estaria associado a danos irreparáveis na biodiversidade e conseqüentemente, na vida humana.

Figura 4: Cenários de emissões 2000-2100



Fonte: IPCC, 2014

Após a divulgação desse relatório, em 2015, ocorreu a COP 21 que foi marcada pela elaboração do Acordo de Paris, assinado em 2017. Diferentemente do Protocolo de Quioto, esse acordo resultou em diferentes documentos de acordo com as condições e necessidades de cada país, desenvolvidos ou em desenvolvimento, denominados *Nationally Determined Contributions* (NDCs), todos com um mesmo objetivo principal, manter o aumento de temperatura em menos de 2°C até o final do século.

Essa deliberação também previa esforços para que o limite fosse em 1,5°C. Esse alerta foi explicado por estudos do *World Resources Institute* (2019), que indicaram diferenças relevantes para essa variação de 0,5°C, como é mostrado na Figura 5 a seguir. As diferenças são observadas na exposição do planeta às ondas de calor, condições hídricas tanto na fase líquida, como nas geleiras, extinção na fauna e flora, além de efeitos nos ecossistemas aquáticos e terrestres, que afetam diretamente as condições de sobrevivência humana.

Figura 5: Comparação das consequências entre 1,5 °C e 2°C de aumento na temperatura mundial



Fonte: World Resources Institute, 2019

Nesse mesmo acordo, como meio de alcançarem os objetivos, os países desenvolvidos deveriam investir no mínimo USD 100 bilhões/ano em medidas para tal finalidade. A principal crítica sobre a efetividade desse acordo é a ausência de sanções e punições contra desvios sobre as regras e metas estipuladas. Além disso, os Estados Unidos da América, que em 2017 representavam 14,49% das emissões globais (GLOBAL CARBON ATLAS, 2020), desistiram de assinar o acordo durante o governo de Donald Trump nesse mesmo ano. Segundo Eduardo Viola (2020 para o jornal Eco), professor titular de Relações Internacionais da Universidade de Brasília (UnB) e pesquisador sênior da Universidade de São Paulo (USP), apesar da opinião compartilhada sobre a fragilidade do acordo, ele possui um expressivo papel na atenuação da mudança climática, já que é o único em vigência com participação a nível mundial.

Após quatro anos do acordo, o IPCC divulgou o relatório *Climate Change 2021* e os resultados não foram promissores, apontando um caminho crítico para chegar aos objetivos do Acordo de Paris. Segundo a entidade, o mundo está em uma tendência que projeta o acréscimo de 1,5°C já nas próximas duas décadas. Um alerta vermelho foi a reação que o secretário-geral da ONU, António Guterres, obteve com os resultados. Em contrapartida, o relatório traz como solução reduções radicais e constantes nas emissões de GEE para que a qualidade do ar melhore e a temperatura mundial média entre em estabilidade daqui a duas ou três décadas (IPCC, 2021; ONU, 2021).

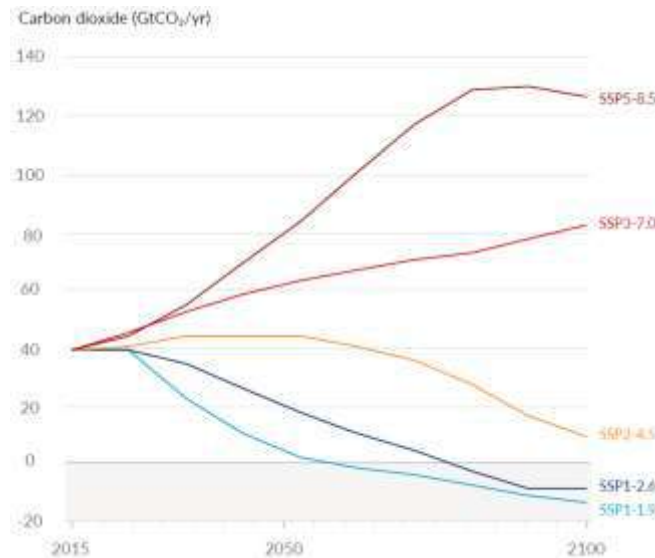
Nesse relatório, os cenários RPCs foram atualizados para SSPs (*Shared Socioeconomic Pathways*), de acordo com a Figura 6, onde os quatro originais foram mantidos, apenas sendo renomeados, e um novo chamado SSP1.9 foi incluído. Essa recém-adquirida opção mantém a elevação de temperatura em no máximo 1,5°C até 2100, caso esforços recomendados sejam cumpridos. Dentre as dedicações necessárias para a concretização desse cenário, o relatório propôs cinco principais estratégias (IPCC, 2021; SCHUMER et al., 2022):

- Ampliar a utilização de energia limpa;
- Investir em inovações para a descarbonização industrial;
- Fomentar as construções verdes⁶;

⁶ Construções desenvolvidas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental por meio de recursos que emitam menos GEE (JARANDILHA, 2021).

- Modificar as infraestruturas urbanas por meio de transportes de baixo e zero carbono;
- Restaurar, conservar os ecossistemas ricos em carbono, utilizando técnicas de manejo florestal, bem como otimizar a produção agrícola.

Figura 6: Possíveis trajetórias das emissões de CO₂ até 2100



Fonte: IPCC, 2021

Expectativas foram colocadas sobre a COP 26, realizada em Glasgow em novembro de 2021, para a criação de prazos para realização de revisões e acompanhamentos das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, na sigla em inglês). Nela foi reconhecido que há a necessidade de reduzir as emissões em 45% até 2030, quando comparado ao cenário em 2010, e grupos de trabalho foram criados para o monitoramento dos dados divulgados pelos países. O Brasil assumiu um incremento nessa meta para 50%, comparado ao cenário de 2005, com o objetivo de melhorar a visibilidade do governo frente às questões ambientais (GENIN; FRASSON, 2021).

2.3 Como a pandemia do Coronavírus influenciou nos planos energéticos dos governos

Entre o fim de 2019 e início de 2020, o mundo foi afetado por um novo Coronavírus, nomeado SARS-CoV-2. Seu primeiro caso registrado de infecção foi detectado na China, na cidade de Wuhan. A doença chamada de COVID-19 possui alta transmissibilidade e ataca o sistema respiratório, com sintomas em uma ampla faixa de

intensidade, desde casos leves, até casos mais severos. O baixo conhecimento clínico sobre como tratar os casos confirmados e suspeitos, assim como meios de reduzir a transmissão, fizeram com que a doença se espalhasse em um ritmo muito veloz, atingindo um acumulado de mais de 500 milhões de casos e 6 milhões de mortes no mundo até abril de 2022 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022).

Dentre as ações de controle adotadas pelos governantes, o isolamento social foi uma das utilizadas de forma quase unânime nos países durante a pandemia. As restrições nos negócios locais e internacionais foram consequências dessa mudança na rotina das populações que reduziram drasticamente a atividade econômica, assim como a demanda energética. Enquanto em 2019 o mundo cresceu em 2,6% do ponto de vista econômico, em 2020 houve uma recessão de 3,4% (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2021; THE WORLD BANK, 2022).

A recuperação econômica dos países apenas se iniciou com o desenvolvimento das vacinas contra a doença e da vacinação de fato, sobre a população, que ocorreu no início de 2021 (CNN BRASIL, 2021). Desde então, segundo o IEA (2022), o mundo vem vivenciando uma recuperação econômica em um ritmo veloz por meio de estímulos, ainda que desiguais, fiscais, monetários e sanitários. Entretanto, essa recuperação da crise não foi realizada de maneira sustentável do ponto de vista ambiental.

As condições do mercado de energia acompanharam as tendências econômicas e um resultado de 5,2% de redução na emissão de CO₂ foi observado entre 2019 e 2020. Apesar disso, o ano de 2021 já foi marcado como o maior emissor desde 2010, com 2,1 Gt lançados na atmosfera, representando 6% de aumento em relação ao ano anterior. Devido a todo histórico de conhecimento sobre as fontes fósseis, além do baixo custo associado à tecnologia envolvida, o consumo desses combustíveis cresceu mais que os protocolos previam. O carvão mineral foi responsável por 40% das emissões, já que o mesmo atendeu um aumento na demanda de energia elétrica, frente a um ápice nos preços do gás natural. As emissões advindas da geração de energia por combustão de produtos fósseis e processos industriais retratam 89% do acréscimo de emissões de GEE (IEA, 2022).

Embora esses resultados sejam negativos no objetivo de descarbonização, o uso de renováveis obteve o único resultado positivo durante a análise do consumo de cada fonte de energia em 2020 quando comparado a 2019, seguido por crescimento recorde

em 2021. Junto à energia gerada por fontes nucleares, os somatórios dessas duas energias evitaram um aumento de 210 Mt de carbono emitido (IEA, 2022). Dessa forma, segundo Keisuke Sadamori, diretor de mercados de energia e segurança do IEA (2021), é preciso aumentar o investimento em massa em tecnologias de energia limpa, ainda que o uso delas esteja em crescente, é preciso acelerar esse fluxo para atingir os objetivos do Acordo de Paris até metade do século.

A conjuntura no Brasil nos últimos dois anos obteve divergências em relação às médias mundiais. Segundo o Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA, 2021), o país foi responsável pelo aumento em 9,5% das emissões de GEE em 2020, resultado associado à alta no índice de desmatamento na Amazônia. Já em 2021, segundo o IEA (2022), o país registrou aumento de 10%. Em paralelo a esses resultados nocivos ao meio ambiente, assim como a tendência mundial, a parcela de 45% de renováveis na matriz energética brasileira em 2019 obteve incremento atingindo 48,3% em 2020. Dentre os países que formam o agrupamento BRICS (Brasil, Índia, China e África do Sul), que representam cerca de 38% do total de energia consumida, o país sul-americano lidera na participação de renováveis (EPE, 2022; IPEA, 2021).

2.4 Biomassa

2.4.1 Definição

Segundo Coelho (1982), biomassa pode ser definida como conjunto de matéria orgânica formado por organismos autótrofos – sintetizam sua fonte de energia a partir de material inorgânico – ou acumuladas e secretadas por heterotróficos – necessitam de matéria orgânica como fonte de sobrevivência. Do ponto de vista energético, de acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa (2022), toda matéria orgânica com potencial de geração de energia pode ser classificada como biomassa. Vale ressaltar que para que essas definições enquadrem essa fonte energética como renovável, é preciso que o organismo que lhe originou tenha sido observado com vida recentemente, isto é, em um período de tempo inferior a 100 anos, e que o mesmo faça parte do ciclo de carbono⁷ (PROBSTEIN E HICKS, 1982; KLASS, 1998).

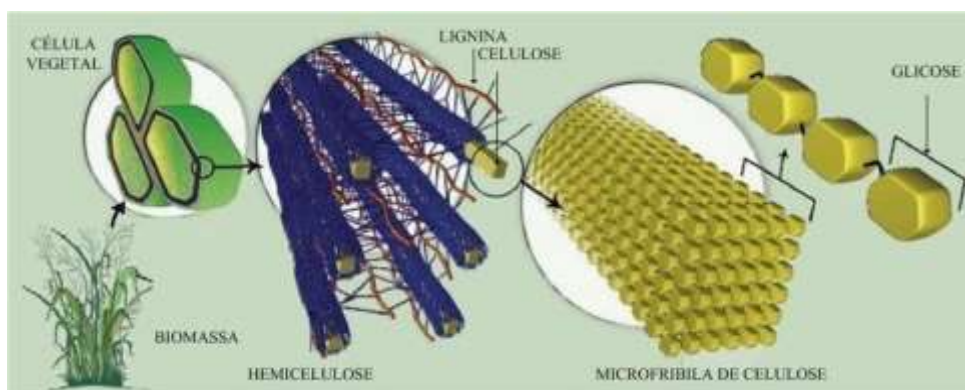
A classificação da biomassa como fonte de energia limpa é dada pelo balanço negativo ou neutro de gás carbônico. Isso porque, apesar da geração de CO₂ durante a

⁷ Processo de movimentação natural do carbono entre emissão e absorção (EMBRAPA, 2004).

reação de combustão, o consumo desse gás durante o processo fotossintético pelos vegetais que estiveram presente no seu ciclo de vida gera um saldo menor ou igual a zero. Esse processo absorve energia solar e gás carbônico, gerando energia química na forma de polímeros naturais e gás oxigênio, parte utilizada para a manutenção das células vegetais e parte armazenada estruturalmente (BIOMASSA BR, 2022a).

Os polímeros estruturais são os elementos aproveitados para a geração de energia, principalmente os polissacarídeos como a celulose, amido e ágar. Quanto mais heterogênea a origem da biomassa, mais diversa será a mistura energética (IEE, 2022). Segundo Cardona, Quintero e Paz (2010), os materiais lignocelulósicos, isto é, com arranjo formado por lignina, hemicelulose e celulose, como observado na Figura 7, são os materiais mais abundantes da biosfera⁸, com parcela representando em torno de 60% da biomassa vegetal no planeta Terra.

Figura 7: Estrutura da biomassa lignocelulósica

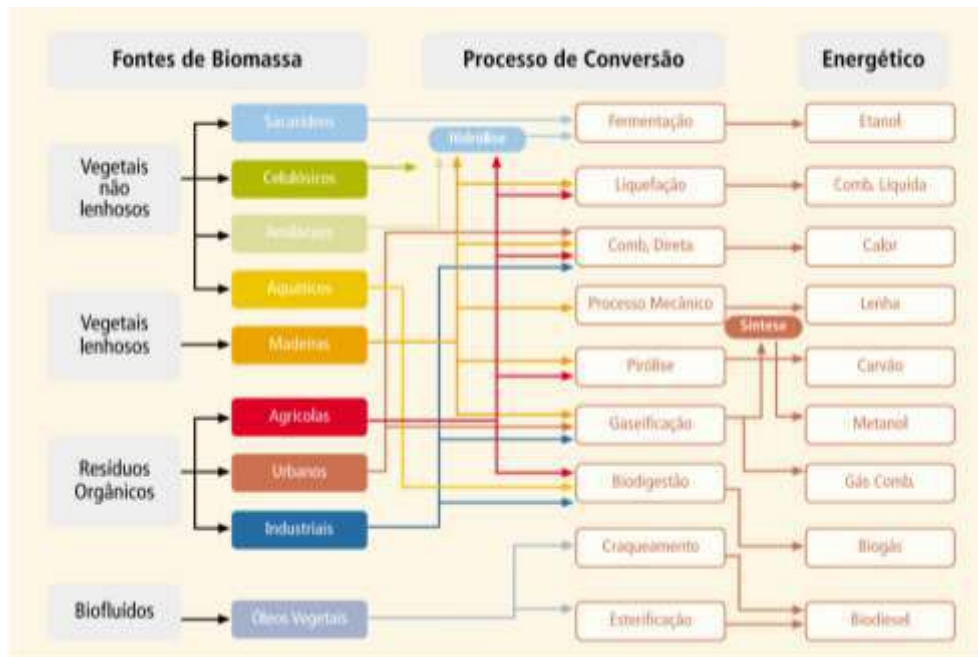


Fonte: Mota et al., 2015

As fontes de biomassa podem ser queimadas diretamente para obter energia, geralmente em condição de baixa eficiência, ou passar por um processo de conversão gerando um produto energético mais eficiente, como indicado na Figura 8. Dentre os processos e produtos mais comuns têm-se os pares: fermentação, etanol; processo mecânico, lenha; pirólise, carvão; biodigestão, biogás; esterificação, biodiesel.

⁸ Regiões do Planeta Terra onde há possibilidade de estabelecimento de organismos vivos (MOREIRA, 2015)

Figura 8: Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: ANEEL, 2005

Dessa forma, observa-se a complexidade atrelada ao uso de biomassa, já que ela possui composição variada de acordo com as diferentes fontes que podem lhe originar influenciando diretamente no projeto do queimador que utilizará o biocombustível ou a biomassa *in natura* para gerar a bioenergia (TABARES et al., 2000). Apesar dessa maior dificuldade, Kanury (1994) elencou seis características positivas compartilhadas entre as diferentes biomassas que influenciam para que elas se destaquem no cenário de energético:

- Facilidade de estocagem;
- Elevado poder calorífico;
- Baixa temperatura de ignição;
- Elevado teor de voláteis;
- Elevada taxa de combustão;
- Baixa energia de ativação.

2.4.2 Classificação

A biomassa é normalmente caracterizada de acordo com sua origem, que pode ser florestal/lenhosa, agrícola/não lenhosa ou derivada de resíduos industriais e urbanos (EMBRAPA, 2022).

2.4.2.1 Biomassa Florestal

São provenientes de matéria prima florestal - troncos, ramos, folhas, cascas e raízes. Podem ser plantadas diretamente com esse objetivo, por meio do manejo sustentável, que explora o plantio de modo a reduzir os impactos por meio de técnicas que permitem a manutenção e recuperação das espécies envolvidas. Também podem ser obtidas por meio de resíduos e coprodutos que seriam descartados em função de um produto principal. Os produtos energéticos formados a partir de Biomassas Florestais mais comuns são a lenha, o cavaco e o pellet de madeira (MORAES, 2022; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2022).

2.4.2.2 Biomassa Agrícola

Nessa classificação a matéria prima é originada de regiões agrícolas, onde a biomassa pode ser obtida por culturas plantadas, ou ainda se configurar como resíduos do cultivo. Esse último possui elevado potencial do ponto de vista ambiental, já que além de derivar de uma fonte renovável, gera valor para um material que seria descartado. Dentre os mais utilizados tem-se plantas com alto teor de carboidrato, gerando etanol de primeira geração⁹, óleos vegetais, formando biodiesel, cascas e bagaços de frutas dando origem ao etanol de segunda geração (MORAES, 2022; CORTEZ, 2008).

2.4.2.3 Resíduos Urbanos e Industriais

Diferentemente dos outros dois tipos de biomassa, esse necessariamente é gerado por meio de restos de origem urbana ou industrial. Podem ter estado físico líquido ou sólido e normalmente são destinados a aterros sanitários ou a depósitos localizados dentro de indústrias. Devido a sua alta heterogeneidade, diferentes rotas tecnológicas podem ser adotadas para a geração de energia de acordo com análises de caracterização da amostra

⁹ Etanol produzido a partir de caldo gerado a partir da moagem da cana-de-açúcar, como fonte da sacarose (EMBRAPA, 2011).

a ser utilizada. Dentre elas, é possível destacar a combustão direta, gaseificação e digestão anaeróbica para a produção de calor, gás combustível ou metanol e biogás respectivamente (IEE USP, 2022).

2.4.3 Uso de Biomassa

2.4.3.1 Mundo

Desde registros pré-históricos, observa-se o uso de matéria orgânica para aquecimento e cozimento de alimentos por meio da geração de calor. A lenha era a forma de combustível mais utilizada pela sociedade e foi perdendo seu papel representativo primeiro com o uso de carvão mineral e depois com o advento do petróleo e de seus derivados (FRANCISCO, 2017). Com o crescimento do efeito estufa e alarmes feitos por pesquisas e expostos nas conferências climáticas já descritas em itens anteriores deste trabalho, a utilização de biomassa vem sendo objeto de estudos para a obtenção de uma matriz energética mais renovável (PHILIPPI JÚNIOR E DOS REIS, 2016).

Como o uso dessa fonte é observada em fases distintas da evolução humana, diferentes níveis técnicos são utilizados na geração de energia a partir dela. Segundo Simões (2000), países desenvolvidos como Suécia, Áustria, Finlândia e Estados Unidos, utilizam equipamentos mais robustos e de maior conteúdo tecnológico, capazes de obter eficiências de queima de até 80%. Em paralelo, países subdesenvolvidos como Etiópia, Moçambique, Nepal e Butão, utilizam biomassa na forma mais arcaica, resultando em eficiências máximas de combustão de 20%.

Dado que grande parte do consumo de biomassa ocorre de forma não-comercial, já que muitos resíduos são gerados e aproveitados pelas mesmas indústrias, sem passar por etapas de negociação, os números de consumação possuem baixa acurácia frente a realidade. Apesar disso, é possível observar a tendência de crescimento do uso dessa fonte renovável por meio da parcela que é suprida comercialmente para geração de eletricidade.

Segundo o relatório *Global Bioenergy Statistics 2021*, o uso de biomassa destinada à geração de energia elétrica cresceu em torno de 350% no período de 2000 a 2019 no mundo, como mostrado na Tabela 1. Nela observa-se a quantidade de energia em TWh gerada a partir de resíduo residencial, industrial, biomassa sólida, biogás e biocombustíveis líquidos, todos distribuídos no período de tempo analisado. Pode-se notar que a biomassa sólida se destaca, representando cerca de 68% do total de 655,2

TWh de bioenergia na forma de eletricidade produzida em 2019. Com o objetivo de comparação, de acordo com o IEA (2019), o mundo consumiu no referido ano 21.371 TWh de energia elétrica, logo, ainda há um grande potencial de representatividade no mercado.

Tabela 1: Geração de eletricidade a partir de biomassa

	Municipal Waste	Industrial Waste	Solid Biomass	Biogas	Liquid biofuels
2000	34.5	15.3	99.2	13.2	0.00
2005	46.5	11.7	146	21.1	1.98
2010	62.7	24.3	223	46.8	4.99
2015	73.4	26.1	318	83.8	8.26
2016	72.6	35.8	352	85.2	8.37
2017	74.2	39.7	381	86.9	6.97
2018	76.3	39.9	409	88.5	8.34
2019	75.7	37.0	443	88.8	10.7

Fonte: Global Bioenergy Statistics, 2021

Nesse histórico, observa-se que a utilização de biomassa no setor elétrico apresenta tendência de crescimento. De acordo com o artigo *Bioenergy Power Generation* (Bioenergia para produção de eletricidade, em inglês) divulgado pelo IEA (2021), em 2020 ocorreu um aumento de uso de 8% em relação ao ano anterior, representando cerca de 50 TWh gerados adicionalmente. Segundo esse mesmo estudo, as políticas que apoiam o desenvolvimento do uso de bioenergia estão ganhando destaque em todo o mundo, mas serão necessários esforços maiores para garantir que as metas do Acordo de Paris sejam alcançadas e o ritmo de crescimento da geração de energia a partir de biomassa seja mantido nos próximos anos.

2.4.3.2 Brasil

Diante do cenário global, o Brasil se posiciona com vantagens diante dos outros países. Isso devido às condições climáticas, disponibilidade hídrica, espaço físico para expansão nas regiões interioranas e população continental produzindo resíduos (RUIZ, 2015). As três classificações de biomassa estão incluídas no Plano Nacional de Energia 2050, instrumento de planejamento a longo prazo das estratégias governamentais em relação ao setor energético. De forma mais específica tem-se a Biomassa Florestal e

Agrícola dentro do Plano Nacional de Agroenergia (2006), e os resíduos urbanos e industriais no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2020).

Segundo o relatório “Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura¹⁰ (2020)”, divulgado pelo IBGE, a área estimada de florestas plantadas no Brasil em 2020 era de 9,3 milhões de hectares. O documento analisa o valor de produção dessa atividade no país, isto é, o preço bruto do produto multiplicado pelo total produzido. A Figura 9 apresenta a distribuição desses números por cada uma das cinco regiões do Brasil (EMBRAPA, 2022).

Figura 9: Participação regional no valor da produção florestal (%)

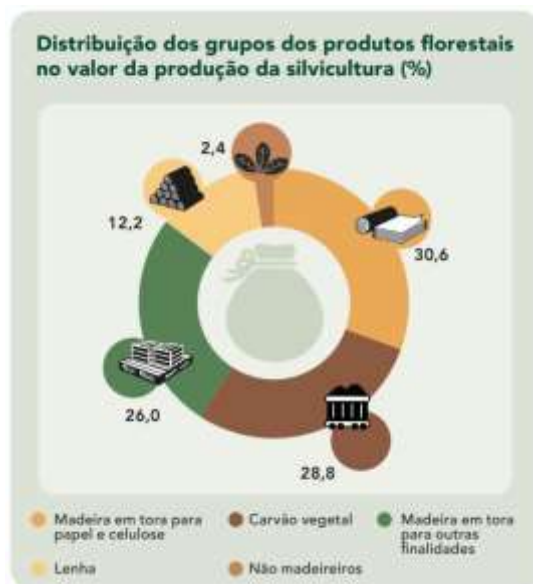


Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura, 2020

Segundo a Figura 10, 41% do valor de produção total de florestas plantadas no país é destinado a produção de lenha (12,2%) e carvão vegetal (28,8%), além de 26% incluindo outras finalidades, sendo os resultados dos pellets de madeira uma delas. As regiões Sul e Sudeste representam a maior parcela do referido índice destinado ao uso comercial. As espécies florestais com maior representatividade econômica no país são Eucalipto e Pinus.

¹⁰ É o cultivo florestal por meio de técnicas de manejo que visam suprir a demanda do mercado ao mesmo passo que promove o uso consciente do ponto de vista ambiental (ADAPEC, 2022).

Figura 10: Distribuição dos grupos dos produtos florestais no valor da produção da silvicultura (%)



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020

As florestas plantadas são responsáveis por mais de 90% do total da madeira comercializada, o que coloca o Brasil como referência mundial no setor madeireiro, principalmente na produção de papel, celulose e painéis compensados. O país possui duas vantagens diante de outros territórios, apresentando uma alta produtividade e uma baixa rotação. A primeira representa o volume de madeira produzida por unidade de área a cada ano. Enquanto a produtividade média brasileira é de 38 a 70 m³/(ha ano), no hemisfério norte a produtividade é em torno de 12 a 20 m³/(ha ano) (LABATE, 2019; CAIRES, 2022). Já a segunda vantagem diz respeito ao intervalo de tempo entre o plantio e a colheita das árvores, no qual verifica-se de 6 a 7 anos no Brasil frente a mais de 30 anos no Canadá, por exemplo (CAIRES, 2022). Esses resultados positivos reduzem os riscos associados a problemas no fornecimento de matéria prima em projetos com madeira.

Durante a avaliação do Inventário Energético de Resíduos Rurais, em 2014, sete principais resíduos da atividade agrícola foram analisados. O relatório apontou a quantidade desses subprodutos em Mt produzidos em 2010 no país, o potencial de geração de energia pelo aproveitamento dos mesmos, assim como a quantidade de energia gasta para a geração dos mesmos, permitindo avaliar o saldo energético positivo entre geração e consumo, representados na Tabela 2. Vale salientar que o cálculo de energia gerado foi realizado visando a utilização desses resíduos para a produção de biodiesel.

Tabela 2: Consumo energético para disponibilização dos resíduos agrícolas

	Resíduos Disponíveis 2010 [10⁶ tBbs]	Energia Disponível nos Resíduos [ktep/ano]	Energia Necessária para Disponibilização dos Resíduos [ktep/ano]
<i>Palha de Arroz</i>	14	5.281	164
<i>Palha de Feijão</i>	4	478	47
<i>Resíduos de Algodão</i>	1	412	10
<i>Ramas de Mandioca</i>	16	2.341	52
<i>Palha de Milho</i>	101	17.048	1.195
<i>Palha de Soja</i>	94	9.848	1.116
<i>Palha de Trigo</i>	17	2.006	200

Fonte: Adaptado do Inventário Energético de Resíduos Rurais, 2014

No que tange o quadro de resíduos sólidos, o país possui mais de 200 milhões de habitantes gerando lixo diariamente. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020), 79 milhões de toneladas são geradas por ano no país, representando 379 kg/per capita por ano. Segundo esse mesmo relatório, atualmente os resíduos urbanos e industriais são mais utilizados no processo de reciclagem e logística reversa, tendo a queima para geração de energia apenas como opção final de reaproveitamento.

Uma forma de aumentar a densidade energética de combustíveis derivados de biomassa é a adoção do processo de pelletização. Esse processo modifica apenas as propriedades físicas da matéria prima ao transformar biomassa na forma moída em blocos compactados. Os produtos chamados pellets podem ser produzidos a partir de biomassa florestal, resíduos madeireiros, agrícolas, agroindustriais e urbanos. As especificidades de cada matéria prima irão demandar tratamentos diferentes a fim de obter um biocombustível qualificado para a geração de eletricidade e aquecimento. Os pellets de origem madeireira, isto é, de biomassa lignocelulósica, são os mais comuns no mercado. Apesar disso, pellets derivados de bagaço e palha de cana-de-açúcar estão sendo desenvolvidos para o aproveitamento desses resíduos, como é o caso do projeto da Raízen (EMBRAPA, 2012; BIOMASSA BR, 2022b; GOVERNO DO PARANÁ, 2021).

Nesse contexto, o presente trabalho terá como foco a produção dos pellets de madeira de origem florestal, produzidos no Brasil.

2.5 Pellets de Madeira - Caracterização do produto

Pellets de madeira são combustíveis sólidos granulados produzidos a partir de biomassa florestal ou resíduos da indústria madeireira. Formados pela compactação em alta pressão dessas matérias primas moídas, esses produtos adquirem formato cilíndrico com bases não regulares, assim como retratado na Figura 11. Devido ao seu processamento, possuem baixa umidade relativa que proporciona uma elevada densidade energética resultando em uma boa eficiência de queima (ABIB, 2020). Como esse produto é derivado de uma fonte renovável, o mesmo é classificado como Biocombustível, segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA), e vem contribuindo com as metas do Acordo de Paris.

Figura 11: Pellets de madeira



Fonte: ABIB, 2020

2.5.1 Descrição físico química do produto

Segundo Hahn (2004), os principais critérios que permitem a caracterização da qualidade dos pellets são sua composição química e suas propriedades físicas. Com esses parâmetros, é possível prever os efeitos de sua estocagem, distribuição e utilização, bem como indicar seus limites de uso. Dessa forma, é preciso entender cada item que compõe sua caracterização, como estão descritos nas Tabela 3 e Tabela 4 a seguir

Tabela 3: Características químicas dos pellets de madeira

Característica química	Descrição	Unidades avaliadas	Faixa média comercial	Fonte
Poder calorífico inferior	Quantidade de energia liberada por unidade de massa ou de volume durante a reação de combustão completa do combustível em análise. É dito "inferior", pois ao final do processo, a água residual encontra-se no estado vapor, logo, não há a adição do calor de vaporização da água, caso ela estivesse no estado condensado como é verificado no poder calorífico superior (ANDRADE, 2011).	MJ/kg	16 a 23 (DB ¹¹)	EPC, 2022
Teor de voláteis	É a fração do combustível que passa para a fase gasosa durante o aquecimento, antes da queima, pelo processo de decomposição inicial chamado pirólise. Ele irá influenciar no comprimento da chama, acendimento e volume de material necessário (BIZZO, 2003).	% (m/m)	75 a 85 (DB)	BRITO E BARRICHELLO (1982)
Umidade	Quantidade de água presente no combustível. Afeta diretamente o balanço energético, pois quanto menor a umidade, maior a produção de calor por unidade de massa (Vale et al, 2000).	% (m/m)	5 a 10 (ARB ¹²)	TUMULURU (2014)
Teor de carbono fixo	É um parâmetro que indica a queima no interior do leito, já que o carbono atua como principal elemento do combustível na reação de combustão, possuindo relação direta com o poder calorífico (Vale et al, 2000).	% (m/m)	14 a 25 (DB)	BRITO E BARRICHELLO (1982)
Teor de cinzas	Fração que resta após a queima do material. Contém concentrações de óxidos de elementos provenientes dos combustíveis (Ca, Mg, Fe, Na, K, entre outros) e/ou compostos orgânicos formados por combustão incompleta, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (ORECCHIO, 2016).	% (m/m)	0 a 5 (DB)	GARCIA (2010)
Teor de enxofre	Encontram-se em baixas concentrações na biomassa, mas devem ser regulados já que geram emissões de SO _x - gás nocivo à saúde humana e um dos gases que promove chuva ácida (JENKINS et al, 1996)	% (m/m)	0 a 0,3 (DB)	DIAS (2002)

¹¹ Medição não inclui a quantidade total de água, do inglês *dry basis*

¹² Medição inclui a quantidade total de água, do inglês *as received basis*

Teor de cloro	Encontram-se em baixas concentrações na biomassa, mas devem ser regulados já que é um elemento altamente nocivo ao meio ambiente e pode formar HCl - promove a corrosão nas paredes dos queimadores (GARCIA, 2010). Além de gases organoclorados mutagênicos como dioxinas e furanos (NIELSEN et al., 2000)	% (m/m)	0 a 0,15 (DB)	GARCIA (2019)
Teor de nitrogênio	Encontram-se em baixas concentrações na biomassa, mas devem ser regulados já que geram emissões de NOx, HCN e N2O, gases nocivos e com altas restrições de emissões (GARCIA, 2010)	% (m/m)	0 a 1,27 (DB)	POMPEU, 2019

Fonte: Elaboração própria a partir das fontes indicadas

Tabela 4: Características físicas dos pellets de madeira

Característica física		Descrição	Unidades avaliadas	Faixa média comercial	Fonte
Densidade a granel		É a razão entre massa e volume de material. Mede o quanto determinada massa ocupa no produto, considerando seus poros vazios. Logo, influencia na estocagem, transporte e logística do produto. Está diretamente relacionada à densidade energética do material, medida a partir da densidade a granel e poder calorífico (SPANHOL et al, 2014; GARCIA, 2010).	kg/m ³	560 a 690 (ARB)	PASTRE, 2002
Dimensões	Diâmetro	São características das dimensões cilíndricas do material. Precisam ser consistentes para atender as necessidades energéticas do projeto de funcionamento do sistema de combustão (EPC,2022).	mm	Próximo a 6 (ARB)	GARCIA, 2010
	Comprimento		mm	6 a 35 (ARB)	GARCIA, 2010
Durabilidade mecânica		Reflete a resistência do material ao ser submetido a choques. Quanto maior, menos propenso a quebras e esfarelamentos durante o transporte, armazenagem e alimentação nos queimadores, mantendo a consistência inicial do material e reduzindo a produção de poeira (EPC,2022).	%	80 a 100 (ARB)	GARCIA, 2010
Quantidade de finos		Finos são as pequenas partículas (<3mm) de madeira que se soltam do material. Está diretamente ligado a segurança do processo, já que podem causar explosão no transporte e sua inalação por seres humanos é nocivo ao sistema respiratório (EPC, 2022; GARCIA, 2010).	%	0,5 a 1,7 (ARB)	SPANHOL et al, 2014

Fonte: Elaboração própria a partir das fontes indicadas

Além dessas características principais, a quantidade de metais pesados também deve ser analisada. Segundo Garcia (2010), caso presente no pellet de madeira, as quantidades de Chumbo (Pb), Zinco (Zn) e Cádmio (Cd) são observadas em emissões após a combustão e devem ser regulados, já que esses elementos são tóxicos para os seres humanos e meio ambiente. De acordo com uma pesquisa realizada pelo Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro (2015), testes com pellets de madeira certificados por normas qualificadas não emitiram metais pesados. Entretanto, os resultados de alguns produtos derivados de resíduos do setor madeireiro, sem certificação, apontaram emissões de metais pesados. A investigação do caso em Portugal indicou que a ocorrência foi devido à utilização de colas e tintas nas madeiras utilizadas como matéria prima.

Tendo em vista que a lignina presente na estrutura da madeira possui característica ligante, a presença adicional de agentes com essa função é necessária apenas quando a quantidade de lignina na matéria prima encontra-se abaixo do necessário para efetuar o processo de adensamento (TUMULURU, 2011). Segundo Pastre (2002) essa adição não deve prejudicar a combustão, gerar odores ou emitir gases tóxicos. Os compostos mais utilizados para desenvolver essa função são os lignosulfonatos¹³, amido de milho, farelo de canola ou outra matéria vegetal com capacidade de aglomeração.

O uso de pellets de madeira possui vantagens em relação ao uso de biomassa florestal não processada. Em relação ao poder energético, como consequência ao processo mecânico de adensamento do material, esse produto gera cerca de cinco vezes mais energia quando comparado ao cavaco de madeira, por exemplo. Um produto em desenvolvimento capaz de obter um poder calorífico ainda maior é o pellet torrefado, que será descrito na seção 2.5.5. Além disso, outra vantagem está associada à ausência de risco fitossanitário, que pode ocorrer nos subprodutos madeireiros por ação de insetos sobre as florestas (FLØ, D et al., 2015).

Vale ressaltar que a qualidade do pellet de madeira está diretamente relacionada à escala de uso. Enquanto o uso em menor escala, tipicamente residencial, requer uma qualidade superior, com baixa quantidade de finos e cinzas associado a dimensões mais uniformes, a utilização industrial requer o produto com qualidade um pouco menos rígida.

¹³ Subproduto rico em lignina derivado da indústria de celulose, com propriedade adesiva (CAMPAGNER et al., 2014)

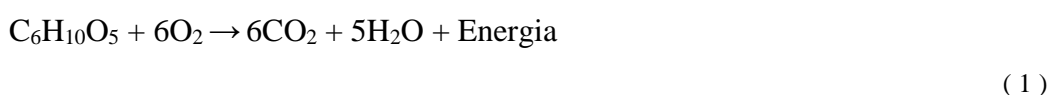
Isso porque os sistemas são mais robustos e podem contornar limitações de emissões de finos e cinzas, e de variação nas dimensões físicas do biocombustível (GARCIA, 2010).

Dessa forma, é possível evidenciar os seguintes pontos positivos acerca da qualidade dos pellets de madeira (GARCIA et al., 2013):

- Alta densidade energética comparado a outros biocombustíveis sólidos, posicionando o pellet de madeira como possível substituto aos combustíveis tradicionais;
- Baixo teor de umidade que além de aumentar a densidade energética, evita a proliferação de fungos;
- Manuseio facilitado pela boa resistência aos choques;
- Geometria regular que facilita a automatização de processos de injeção nos queimadores;
- Alto teor de voláteis que facilita o processo de queima, acelerando a decomposição inicial da fase gasosa;
- Permite o estoque de energia, na forma de produto, sendo competitivo quando comparado a outras fontes renováveis que não podem ser estocadas, como solar e eólica.

2.5.2 Conversão do produto em energia

De acordo com Brito e Barrichelo (1981), a composição elementar da madeira é bastante variável com 30 a 50% de celulose, 22 a 40% de lignina, 9 a 28% de pentosanas, 0 a 12% de mananas e galactanas, além de produtos extraíveis de 0,2 a 20% a depender da espécie florestal. A reação de combustão do pellet de madeira é dada principalmente pela macromolécula principal, a celulose – carboidrato complexo do tipo polissacarídeo, formado por grandes cadeias de moléculas de glicose – como representada na Eq. (1) (FPL, 2010):



A queima do material se inicia com o processo de pirólise, liberando os componentes voláteis na temperatura entre 190 e 300°C, responsáveis pela formação da chama. A decomposição ocorre com a quebra das ligações de hemicelulose, celulose e lignina, liberando os componentes como fontes de carbono para a reação de combustão

(WETHER et al., 2000; KANURY, 1994). De acordo com Eskilsson et al. (2004), as hemiceluloses são os primeiros componentes a se decompor entre 200 e 260°C, seguido pela celulose entre 240 e 350°C e finalmente a lignina entre 280 e 500°C. Vale destacar que a geração de energia ocorre desde o início do processo de queima e como a quantidade de voláteis na biomassa florestal é alta, cerca de 70% da energia total é liberada durante essa volatilização (WETHER et al., 2000).

A eficiência de combustão encontra-se ligada às características do combustível e dos queimadores. Propriedades termoquímicas, isto é, que refletem na absorção ou liberação de energia na forma de calor, como entalpia¹⁴ e temperatura da reação, energia de ativação¹⁵ e teor de cinzas dependem principalmente dos teores de umidade, carbono fixo e voláteis dos pellets de madeira. Já a taxa reacional com que a combustão ocorre depende essencialmente das dimensões do pellet de madeira, indicando como ele realiza a transferência de calor entre sua superfície e o ambiente que aproveitará a energia gerada, além da densidade do produto, que indicará o quanto há disponível de massa para aproveitamento em determinado volume (KANURY, 1994).

Em relação aos equipamentos queimadores, a mistura em proporções estequiométricas de ar e combustível, o controle da temperatura e o tempo de residência na câmara de combustão são essenciais. Nesse caso, não apenas a otimização na geração de energia é influenciada, como também a classificação dos pellets de madeira como energia limpa. Baixas temperaturas, insuficiência de oxigênio e período de residência inferior ao necessário contribuem para uma combustão incompleta, gerando gases poluentes (OLSSON, 2004).

Devido à quantidade reduzida de umidade no pellet de madeira, associada a compactação mecânica do produto, a eficiência de combustão é maior se comparada a outros biocombustíveis e torna o produto competitivo em relação às fontes fósseis. A Tabela 5, elaborada por Pereira (2014), expõe o poder calorífico dos combustíveis fósseis tradicionais e dos cavacos de eucalipto em MJ/kg. Adicionalmente, temos o carvão mineral do tipo turfa ou linhito com cerca de 16 MJ/kg e do tipo betuminoso com faixas de poder calorífico entre 29 e 36 MJ/kg (BRANCO, 2014b). A comparação desses valores com a faixa numérica dessa propriedade energética dos pellets de madeira indicada na Tabela 3 (16 a 23 MJ/kg) atesta que o poder calorífico desse biocombustível é maior que

¹⁴ Propriedade de uma substância relacionada ao calor de uma reação, permitindo a avaliação de absorção ou liberação dele (ATKINS, 2006).

¹⁵ Energia mínima para que uma reação química se inicie (ATKINS, 2006).

o dos cavacos de madeira, mas é menor que os valores nominais da maior parte dos combustíveis fósseis. Apesar disso, nesses casos de diferença energética, os pellets de madeira podem ser utilizados em substituição às fontes fósseis, necessitando, porém, de maior quantidade em massa para suprimir a discrepância.

Tabela 5: Propriedades dos combustíveis fósseis e biocombustíveis

Combustível	Densidade (kg.m ⁻³)	PC (MJ.kg ⁻¹)	Densidade energética (GJ.m ⁻³)
Óleo Diesel ^a	851	42,65	36,30
Óleo Combustível (médio) ^a	999	40,00	39,96
Gasolina (médio) ^a	738	44,23	32,64
Gás Natural ^a	0,654	35,84	23,44.10 ⁻³
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ^a	552	46,20	25,50
Cavacos de eucalipto*	278 ^b	10,60 ^a	29,47
Etanol hidratado ^a	809	24,97	20,20
Biodiesel ^c	880	40,70	35,82

PC = Poder calorífico. * Umidade (base seca) = 30%. ^aDados obtidos do Balanço Energético do Estado de São Paulo 2010: Ano Base 2009 (Secretaria De Saneamento E Energia Do Estado De São Paulo, 2010). ^bDado de Queiroz (2002). ^cDados de (Zuniga et al., 2011).

Fonte: Pereira, 2014

2.5.3 Normas aplicadas

Devido a variabilidade dos tipos de biomassas utilizadas como matéria prima na produção de pellets de madeira, a necessidade de estabelecer normas de qualidade do produto e controles sobre a fabricação surgiu como consequência do crescimento do mercado desse biocombustível (WIHERSAARI et al., 2009). Segundo o PelletAtlas (2009), as normas funcionam como ferramenta de apoio à inovação e estruturação de mercado, estimulando a concorrência entre produtores e o interesse de investidores. A conformidade dos critérios técnicos e ambientais de cada uma das certificações afeta toda a cadeia de fornecimento, desde produtores e fabricantes de equipamentos, até consumidores (VERHOEST e RICMANS, 2012).

Do ponto de vista dos produtores, a limitação imposta por uma norma garante a qualidade do produto final, por meio de uma cadeia produtiva com elevado controle regulatório. Além disso, a precificação dos pellets de madeira torna-se mais estruturada acompanhando as tendências do mercado internacional quando o produto é classificado sob especificações pré-determinadas. Nessa conjuntura, Huger et al. (2014) afirmam que indústrias produtoras que seguem normas durante a fabricação de produtos garantem

liderança de mercado e, como consequência, possuem vantagem competitiva sobre concorrentes que não atuam da mesma forma.

Para os fornecedores de equipamentos industriais envolvidos na geração de bioenergia a partir de pellets de madeira, a disponibilização de produtos enquadrados em determinadas especificações é importante para o desenvolvimento estrutural dos equipamentos. Os materiais de base que estarão em contato com o biocombustível devem ser projetados de acordo com as necessidades, de modo a maximizar a eficiência do processo de queima. Além disso, após desenvolvidos, os equipamentos irão orientar os operadores sobre quais tipos de pellets de madeira podem ser utilizados, aumentando a durabilidade e produtividade na geração de energia (ALAKANGAS, 2010).

Por fim, para os consumidores os benefícios das normas estão ligados a uma escolha assertiva durante a compra do produto. Isso porque cada consumidor irá utilizar o pellet de madeira com um objetivo sob determinadas condições. Logo, a construção e aplicação de padrões permite um consumo que pondera as qualidades técnicas e os custos associados, buscando um perfil ótimo de acordo com o objetivo do consumidor, seja ele residencial, industrial ou ainda comercial (SOPHA e KLÖCKNER, 2011).

Dessa forma, a maior parte das normas estabelecem faixas nominais de características físico químicas, bem como os métodos que devem ser utilizados para avaliação. Alakangas (2010), afirma que os parâmetros dos pellets de madeira normalmente avaliados e suas respectivas unidades são:

- Dimensões (diâmetro e comprimento) - mm;
- Teor de umidade - %;
- Teor de cinzas - %;
- Resistência mecânica à compressão e ao choque - % da massa;
- Teor de finos - % da massa;
- Poder calorífico inferior (PCI) - MJ/kg ou kWh/t;
- Massa volúmica aparente (razão entre a massa da estrutura sólida seca e o volume aparente da amostra) ou densidade a granel - kg/m³;
- Teores de enxofre (S), cloro (Cl) e nitrogênio (N) - % do produto seco;
- Temperatura de deformação das cinzas - C°;
- Opcionalmente, os teores de metais pesados: arsênico (As), cobre (Cu), cromo (Cr), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) - mg/kg.

Nesse contexto, os países pioneiros no mercado dos pellets de madeira foram desenvolvendo normas nacionais para o uso destinado ao aquecimento residencial, como a Suécia com a SS 187.1200, a Áustria com a ÖNORM M 7135 e a Alemanha com a DIN 51731. O crescimento do mercado acompanhou a necessidade da criação de uma norma unificada, que englobasse todos os atores da cadeia de fornecimento e estabelecesse as condições para uso industrial em maior escala (EPC, 2013). Dentre elas a Alemanha criou a DINplus, a França a NF e os Estados Unidos a normatização segundo o *Pellet Fuel Institute* (PFI), mas foi a ENplus®, desenvolvida pelo *Deutsches Pelletinstitut* e promovida pelo *Comité Européen de Normalisation* (CEN) que obteve maior aderência no mundo.

Segundo a análise exposta pelo site oficial da certificação, até maio de 2022, 1.219 empresas foram certificadas, sendo 27 brasileiras, e 14 milhões de toneladas de produto encontravam-se certificados (ENPLUS®, 2022). Rakos (2015) afirma que 65% dos pellets de madeira comercializados no continente europeu foram certificados pela norma ENplus® no ano do trabalho. Em países onde o mercado é mais exigente, como na Áustria e Alemanha, essa porcentagem foi de 90% em 2015.

Para avaliação das propriedades físico químicas, a norma ISO 17225-2 é utilizada, definindo as três classes – ENplus® A1, ENplus® A2 e ENplus® B – de acordo com a Tabela 6 a seguir. Os tipos de madeira que podem ser utilizados como matéria prima em cada uma das classes também são definidos segundo a Tabela 7 (MANUAL ENPLUS®, 2015).

Tabela 6: Limites dos parâmetros para cada classe de pellet de madeira

Propriedade	Unidade	ENplus® A1	ENplus® A2	ENplus® B	Norma de ensaio ¹¹⁾
Diâmetro	mm	6 ± 1 ou 8 ± 1			ISO 17829
Comprimento	mm	3,15 < L ≤ 40 ⁴⁾			ISO 17829
Humidade	w-% ²⁾	≤ 10			ISO 18134
Cinza	w-% ³⁾	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilidade Mecânica	w-% ²⁾	≥ 98,0 ⁵⁾	≥ 97,5 ⁵⁾		ISO 17831-1
Finos (< 3,15 mm)	w-% ²⁾	≤ 1,0 ⁶⁾ (≤ 0,5 ⁷⁾)			ISO 18846
Temperatura dos pellets	°C	≤ 40 ⁸⁾			
PCI	kWh/kg ²⁾	≥ 4,6 ⁹⁾			ISO 18125
Densidade Aparente	kg/m ³ ²⁾	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Aditivos	w-% ²⁾	≤ 2 ¹⁰⁾			-
Azoto	w-% ³⁾	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Enxofre	w-% ³⁾	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Cloro	w-% ³⁾	≤ 0,02		≤ 0,03	ISO 16994
Temperatura de Deformação da cinza ¹⁾	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsénio	mg/kg ³⁾	≤ 1			ISO 16968
Cadmio	mg/kg ³⁾	≤ 0,5			ISO 16968
Crómio	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Cobre	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Chumbo	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Mercúrio	mg/kg ³⁾	≤ 0,1			ISO 16968
Níquel	mg/kg ³⁾	≤ 10			ISO 16968
Zinco	mg/kg ³⁾	≤ 100			ISO 16968

¹⁾ cinza produzida a 815 °C

²⁾ tal e qual

³⁾ base seca

⁴⁾ Um máximo de 1% dos pellets poderá ultrapassar os 40mm. Não são permitidos pellets com mais que 45mm

⁵⁾ No ponto de carregamento do veículo de transporte (camião, navio) no local da produção

⁶⁾ À porta da fábrica ou aquando do carregamento de um camião para entrega a clientes finais (*Entrega de carga total ou parcial*)

⁷⁾ À porta da fábrica, aquando do enchimento de sacos de pellets ou de Big Bags selados

⁸⁾ No último ponto de carregamento para entregas por camião ao cliente final (*Entrega de carga total ou parcial*)

⁹⁾ Igual ≥ 16,5 MJ/kg tal e qual

¹⁰⁾ O teor de aditivos na produção deverá estar limitado a 1,8 w-%, sendo o teor máximo de aditivos na pós produção (ex.: óleos de revestimentos) limitado a 0,2 w-%.

¹¹⁾ Até que as normas ISO mencionadas não sejam publicadas, as análises devem ser realizadas de acordo com as normas CEN.

Tabela 7: Tipos de matéria prima por classe de pellet de madeira

ENplus® A1	ENplus® A2	ENplus® B
1.1.3 Madeira de tronco ^{a)}	1.1.1 Árvore inteira sem raízes ^{a)}	1.1 Madeira virgem da floresta, plantações e outros ^{a)}
1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}	1.1.3 Madeira de tronco ^{a)}	1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}
	1.1.4 Resíduos de exploração florestal ^{a)}	
	1.2.1 Resíduos e subprodutos não tratados quimicamente da indústria de processamento da madeira ^{b)}	1.3.1 Madeira usada não tratada quimicamente ^l

a) Madeira que tenha sido tratada externamente com conservantes contra ataques de insetos (ex.: *lineatus*), não é considerada como madeira tratada quimicamente, se os parâmetros químicos dos pellets cumprirem os limites e/ou as concentrações sejam demasiado pequenas para representarem preocupação

b) Níveis negligenciáveis de cola, gordura ou outro tipo de aditivos usados na transformação da madeira em serrações ou na produção de madeira através de madeira virgem são aceitáveis, se os parâmetros químicos dos pellets cumprirem os limites e/ou as concentrações sejam demasiado pequenas para representarem preocupação

c) Madeira de demolição está excluída. Madeira de demolição é proveniente da demolição de edifícios ou de instalações de engenharia civil.

Fonte: Manual ENplus®, Parte 3 - Requisitos de Qualidade do Pellet ENplus, 2015

A classe A1 é a qualidade *premium* utilizada em caldeiras ou fogões domésticos. Os pellets A1 produzem a menor quantidade de cinzas e atendem aos mais altos requisitos. A classe A2 é utilizada em instalações de maiores dimensões, produzindo mais cinzas. Os pellets industriais são certificados como “ENplus B”, atendendo requisitos menos rigorosos dentre as três classes, já que as indústrias possuem equipamentos capazes de tratar a formação de cinzas e gases derivados de enxofre, nitrogênio (ou azoto) e cloro (EPC, 2022).

Além de incluir questões de qualidade, a certificação utiliza critérios de sustentabilidade e segurança na estocagem e distribuição dos biocombustíveis. A certificação possui validade durante três anos para produtores e distribuidores, incluindo auditorias anuais geridas por organismos de inspeção qualificados (ENPLUS®, 2022). No Brasil, essas auditorias são realizadas pela Associação Nacional de Pellets Energéticos de Biomassa (ANPEB).

2.5.4 Pellets de madeira no contexto da transição energética

Para que os pellets de madeira atuem de forma positiva na transição energética, é preciso que algumas exigências socioambientais sejam contempladas. De acordo com Goh e Junginger (2013), três pontos principais devem ser atendidos:

- Balanço de emissões de GEE menor ou igual a zero;
- Garantia de produção florestal, cumprindo critérios de sustentabilidade;
- Proteção da população rural que habita o local onde a matéria prima para o biocombustível é explorada.

O balanço de emissões de GEE, principalmente de gás carbônico, isto é, a quantidade de gases enviados para a atmosfera menos a quantidade absorvida dela, necessita ser menor ou igual a zero para a viabilizar o uso de pellets de madeira em substituição aos combustíveis fósseis de forma ambientalmente sustentável. Pinel (2013) avaliou a quantidade emitida de CO₂ durante as etapas de produção, transporte e combustão desse biocombustível quando utilizado para aquecimento residencial, comparado ao uso de óleo combustível. O estudo conclui que sob essas circunstâncias, há uma economia de quase seis vezes quando o pellet de madeira é consumido, saindo de cerca de 280g CO₂ para 34g CO₂ por kWh de energia gerada. Damen e Faaji (2006) realizaram a comparação do uso de pellets de madeira produzidos no Canadá e exportados para a Holanda com o objetivo de gerar energia em usina termelétrica em substituição ao carvão mineral, gerando 600MWh. O resultado de emissões líquidas evitadas de GEE ficou na faixa de 340 a 2100 g/kWh.

A garantia de produção florestal seguindo critérios ambientais deve manter a característica renovável da matéria prima. A qualidade da vegetação, solo, reservas hídricas e ar deve ser mantida, ou ainda melhorada, para que o ciclo de carbono funcione de modo eficaz e as florestas continuem sequestrando o carbono durante o processo fotossintético (MARCHAL et al., 2009).

Outro ponto relevante para o uso adequado de pellets de madeira é o bem-estar das comunidades rurais localizadas próximo a região florestal. A extração de biomassas deve ser realizada de modo a não ameaçar o suprimento alimentar dessas populações. Como a madeira não compõe esse setor, esse biocombustível não gera conflitos na distribuição de alimentos, como pode ocorrer na produção de álcool e biodiesel. Visto

que, é comum o preenchimento da força de trabalho envolvida na extração da matéria prima por esses habitantes, é necessário que os princípios internacionais dos direitos trabalhistas também sejam seguidos (MARCHAL et al., 2009). Além disso, o desenvolvimento da atividade extrativista nesses locais deve ocorrer de maneira organizada para que não haja competição pelo uso de terras (LUPP et al., 2015, MALTSOGLOU et al., 2015).

Na Europa, a associação de compradores chamada de “*Initiative Wood Pellets Buyers*” (IWPB), inclui nove princípios socioambientais para qualificação de pellets de madeira importados, todos baseados nos três pontos citados nos parágrafos acima. Empresas de grande porte na geração de energia como as alemãs EON e RWE, a britânica DRAX, a dinamarquesa DONG ENERGY, a francesa GDF-SUEZ e a sueca VATTENFALL, constituem essa comunidade, indicando a representatividade das exigências socioambientais em todo o mundo (IWPB, 2013).

2.5.5 Estudos futuros – Pellet Torrefado

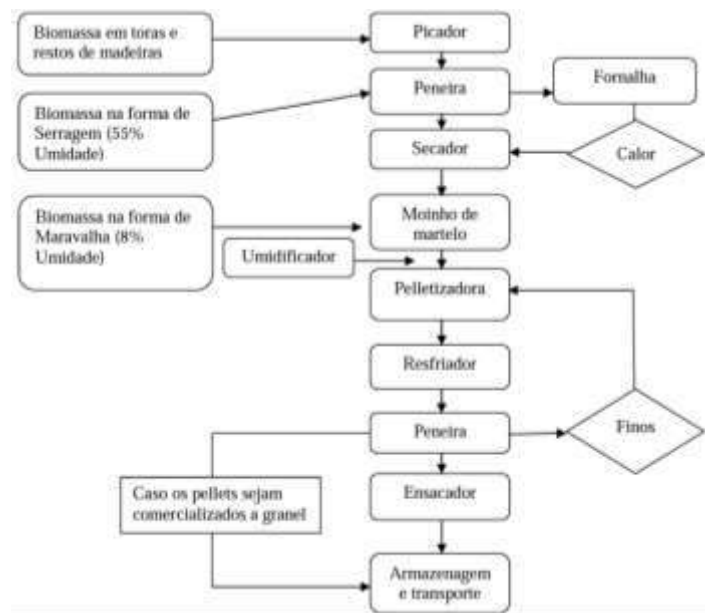
Um dos campos estudados para melhoria da qualidade do bioproduto adensado é a utilização de técnicas de torrefação da madeira. Esse processo tem como objetivo reduzir uma parte do teor de voláteis, a partir da volatilização da hemicelulose, e do teor de umidade, tornando a biomassa florestal ainda mais seca que no produto tradicional, obtendo um pellet de madeira com coloração mais escura (ABIB, 2020). A torrefação caracteriza-se como um processo termoquímico com duração entre 30 e 90 minutos, em atmosfera inerte, com variação de temperatura entre 200°C e 300°C (WIHERSAARI; AGAR; KALLIO, 2009). A energia necessária para o aquecimento vem justamente da energia liberada na volatilização da hemicelulose, obtendo um produto final constituído basicamente de lignina e celulose (ABIB, 2020). Com isso, esse produto atinge faixas de poder calorífico mais altas, entre 20 e 23 GJ/t em testes de menor escala. Nesse contexto, pellets a partir de madeira torrificada ainda não se encontram amplamente disponíveis no mercado, mas sua produção vem tornando-se objeto de diversos estudos para o desenvolvimento de plantas em maior escala. (PIRRAGLIA et al., 2013; ABIB, 2020).

2.6 Pellets de Madeira – Produção

2.6.1 Fluxograma de processo

A produção de pellets de madeira ocorre de modo geral, em nove etapas, segundo a Figura 12 a seguir:

Figura 12: Fluxograma simplificado do processo de peletização



Fonte: Queno, 2015

O processo se inicia com o recebimento da biomassa florestal que será utilizada como matéria prima. Como ela pode ser obtida em diferentes formatos, sob diferentes teores de umidade, cada um dos tipos de material entra no processo em uma determinada etapa, de acordo com as condições do processo. A descrição das etapas segundo Oliveira (2015) e Queno (2015) é dada por:

1ª Etapa

A forma mais bruta da biomassa florestal que pode ser utilizada durante a fabricação de pellets de madeira é no formato de toras ou restos de madeira em maiores dimensões. Quando utilizado, esse material é submetido a uma etapa prévia de picagem, transformando a madeira em lascas menores.

2ª Etapa

O processo continua com uma etapa de peneiramento, onde as lascas obtidas anteriormente são misturadas a serragem, isto é, resíduos da atividade serralheira de madeira, obtendo uma matéria prima com cerca de 55% de umidade. A separação do material em parte formada por geometrias irregulares ou com granulometria fina e parte mais regular, ocorre em filtradores industriais. A primeira fração é direcionada a fornalha para funcionar como combustível na próxima etapa de secagem da segunda fração.

3ª Etapa

Essa etapa inicia o processo mais importante para a formação dos pellets, a redução de umidade. Por meio de um secador, normalmente do tipo tambor rotativo, a matéria prima obtida da etapa anterior é submetida a movimentos circulares sob a ação de ar quente, removendo água, adquirindo umidade final em torno de 10 a 12%.

É importante que o equipamento utilizado esteja capacitado para remoção de cinzas que podem ser geradas com a queima de pequena parte do material em contato com o calor transferido pelo ar quente.

4ª Etapa

A última etapa de redimensionamento ocorre no moinho de martelo. A matéria prima vinda do secador é combinada a biomassa na forma de maravalha, isto é, serragem com umidade reduzida, formando uma mistura com umidade entre 8 e 10%. A homogeneização desse material é realizada com trituradores, normalmente do tipo moinho de martelo, resultando em partículas com comprimento máximo de 2mm.

Antes de seguir para a próxima etapa, um umidificador pode ser utilizado para ajustar o teor de água, caso ele esteja muito abaixo do indicado.

5ª Etapa

Nessa fase a matéria prima triturada será enviada a um equipamento de peletização, capaz de prensar o material de maneira mecânica e obter o formato de pellets. A matriz do equipamento possui um arranjo com orifícios de diâmetro projetado de acordo com o interesse do produtor. Conforme o maquinário gira, a pressão interna força a passagem do material pelos orifícios, como indicado na Figura 13. O comprimento do material também é uma característica que será projetada de acordo com o objetivo da produção.

Figura 13: Matriz peletizadora



Fonte: Buhler, 2022

A coesão do pellet ocorre devido ao calor que permite a reorganização da madeira pela ação em maiores temperaturas da lignina ou agente ligante adicionado, reconstruindo as fibras quebradas durante a trituração do material, ligando novamente os componentes no formato desejado. Dessa forma, o produto sai dessa matriz com temperatura em torno de 95°C.

6ª Etapa

O processo segue com o resfriamento desse produto, que deve ocorrer de forma lenta para que as propriedades mecânicas se mantenham, como a resistência e durabilidade. A estabilização da lignina ou de outros agentes ligantes adicionados é essencial para um bom empacotamento e ocorre conforme o produto é resfriado e esses componentes voltam a se solidificar.

7ª Etapa

Assim como na segunda etapa, nesta o produto passa por uma etapa de filtração para selecionar os produtos que estão adequados e redirecionar os que não estiverem para a peletizadora novamente. Os pellets de madeira que estiverem com dimensões adequadas estarão prontos para a comercialização a granel, direcionados diretamente para a 9ª etapa, ou ensacados.

8ª Etapa

Caso o biocombustível seja vendido em sacos, uma etapa de ensacamento torna-se necessária.

9ª Etapa

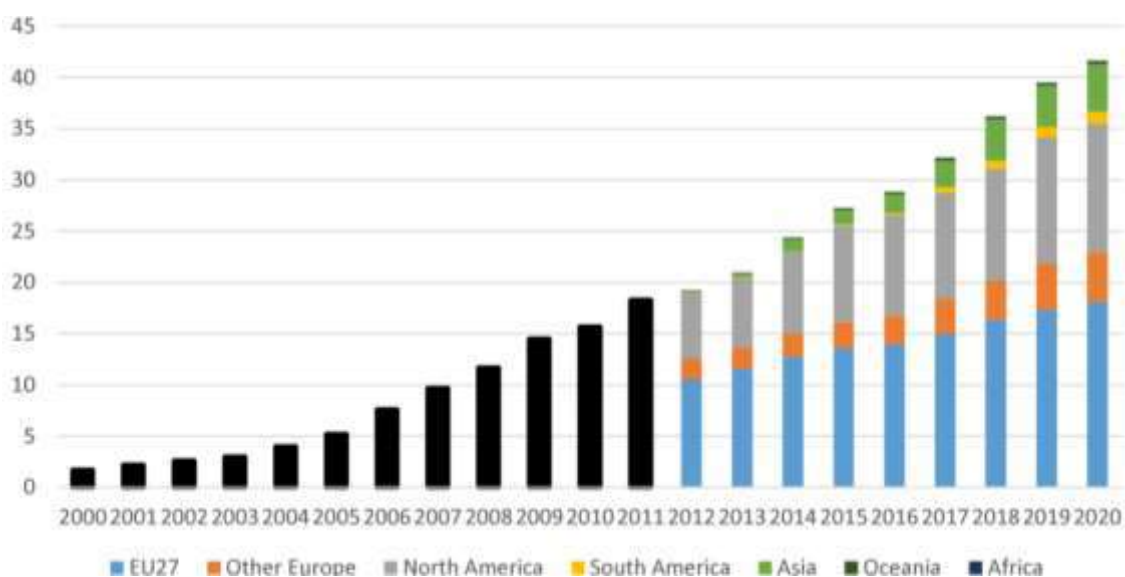
Por fim, os pellets de madeira são armazenados e transportados para o consumidor. As descrições dessas duas fases serão realizadas na seção 2.7.

Dessa forma, pode-se observar que o processo de fabricação de pellets consiste basicamente de três operações – homogeneização de dimensões físicas, secagem e densificação do material. Logo, os parâmetros de maior importância são temperatura, pressão, umidade, dimensões das partículas e densidade.

2.6.2 Produção mundial

O mercado de pellets de madeira, assim como outros biocombustíveis, tornou-se mais promissor de forma oportuna, quando os preços do petróleo aumentaram e impostos sobre o uso de combustíveis fósseis foram sendo criados no final do século XX e início do XXI. De acordo com o relatório *Bioenergy Europe Pellets Report (2021)*, um crescimento acelerado foi observado a partir de 2007, quando cerca de 10 milhões de toneladas de pellets de madeira foram produzidos. Essa tendência se manteve até o último ano analisado pelo documento em 2020, quando a produção alcançou mais de 41 milhões de toneladas, como pode ser observado na Figura 14. Vale ressaltar que o relatório apenas compartilhou dados distribuídos por localidade a partir de 2012, por esse motivo, até 2011 as colunas foram mantidas em preto.

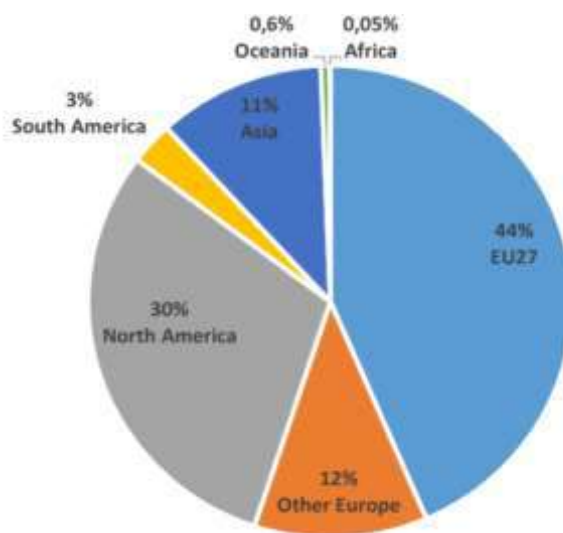
Figura 14: Evolução global da produção de pellets de madeira no mundo em milhões de toneladas



Fonte: Bioenergy Europe Pellets Report, 2021

Os países da União Europeia (UE) são os líderes na produção desse biocombustível, representando 44% desse mercado em 2020, seguidos pela América do Norte, países europeus que não fazem parte da UE, Ásia, América do Sul e por último, África (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021). Essa distribuição pode ser observada na Figura 15 a seguir.

Figura 15: Distribuição da produção mundial de pellets de madeira em 2020 em %



Fonte: Bioenergy Europe Pellets Report, 2021

Enquanto na Europa a produção é dedicada majoritariamente para uso interno, na América do Norte, no sudeste asiático e na Rússia a fabricação do produto é maior que a demanda nacional, gerando um fluxo de exportação relevante (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021). Isso encontra-se fortemente atrelado às políticas de descarbonização vigentes na Europa que incentivam o uso de renováveis (FONTELES, 2020).

Tendo em vista esse contínuo desenvolvimento, entre 2019 e 2020, um crescimento de produção de pellets de madeira de 5% foi observado. Os três maiores países que contribuíram para esse avanço em volumes absolutos vieram da Europa, Alemanha com 280.000 toneladas, Letônia com 193.291 toneladas e da Rússia com 150.000 toneladas. O mercado na Europa detém cerca de 56% do total de produção desse biocombustível, sendo além do continente de maior produção, o de maior consumo também, com o Reino Unido liderando entre os países europeus (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021).

As principais empresas produtoras em cada localidade são: Enviva Partners LP (maior produtora mundial), EUA; AS Graanul Invest (maior produtora na Europa), Estônia; Fram Renewable Fuels LLC, EUA; Segezha Group JS, Rússia; Tanac S.A, Brasil; Albioma, Canadá (MORDOR INTELLIGENCE, 2022). Além desses grandes produtores, o mercado ainda possui uma parcela de pequenos produtores que não fabricam pellets como produto principal, mas sim como subproduto a partir de resíduos da indústria madeireira (GARCIA, 2017).

As projeções de produção e consumo do mercado de pellets de madeira apontam para uma representatividade cada vez maior desse biocombustível no setor energético. Segundo o relatório *Wood Pellet Market - Growth, Trends, Covid-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027)* desenvolvido pela *Mordor Intelligence (2022)*, espera-se que a demanda europeia por pellets de madeira aumente de 30 a 40% nos próximos cinco anos. Apesar do crescimento de demanda, a produção não possui a mesma expectativa, já que desde 2016 o consumo cresce em um ritmo maior que a produção (BIOENERGY EUROPE PELLETS STATISTIC REPORT, 2021). Isso ocorre devido a dificuldades no suprimento de madeira associado a baixas produtividades das florestas energéticas no continente europeu (TOMASELLI, 2021)

Em paralelo, a projeção estadunidense é bastante promissora. Segundo o *Bioenergy Europe Pellets Report (2021)*, cerca de 9,3 milhões de toneladas de pellets de madeira foram produzidos nos Estados Unidos (EUA) em 2020. Em 2030, o Departamento de Agricultura dos EUA prevê números entre 37 e 47,5 milhões de toneladas produzidas desse biocombustível sólido, um crescimento esperado de cerca de 350% em 10 anos.

Já o mercado de pellets de madeira na América do Sul encontra-se em um estágio de desenvolvimento, com perspectiva de expandir sua representatividade nos próximos anos. Espera-se que a produção do biocombustível cresça de forma sustentável e se torne um importante ator no mercado de exportação e de consumo interno, conforme a indústria de celulose e papel permaneça na atual trajetória mundial de declínio. Os países de maior destaque são Brasil e Chile (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021).

2.6.3 Produção brasileira

No Brasil, observa-se um enorme potencial para a produção de pellets de madeira, isso porque, como já foi comentado no item 2.4.3.2, o país possui uma extensa área de florestas plantadas que podem ser destinadas para este mercado, uma elevada produtividade média e um baixo intervalo de tempo entre o plantio e a colheita das árvores (CAIRES, 2022). Além disso, como também já foi desenvolvido no mesmo item, o Brasil possui uma produção elevada de resíduos madeireiros. Apesar disso, não existem projetos significativos para produção de pellets a partir desses resíduos. Isso ocorre porque eles não permitem sazonalidade no fornecimento de matéria-prima e possuem dificuldades para colocação no mercado, já que são produtos muito heterogêneos, adicionando complexidade nas condições de uso (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021). Segundo o Bioenergy Europe Pellets Report (2021), a competição que pode ser gerada com o etanol de 2ª geração¹⁶ também deve ser mapeada para que não ocorram problemas com o fornecimento de matéria-prima.

Dentre os 52 países com produção de pellets de madeira registrada, o Brasil ficou na posição 12º em 2020, com 1.030.000 toneladas produzidas desse biocombustível, expandindo cerca de 21% comparado ao ano anterior, quando o país produziu 850.000t (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021). Segundo o mapeamento realizado por Garcia (2022), atualmente o Brasil possui 30 produtores de pellets de madeira, concentrados na região sul, com 12 deles certificados segundo a norma ENplus® A1. A maior parte dessa produção é direcionada ao mercado externo, principalmente Europa, que permite a comercialização a preços mais elevados devido a legislações que incentivam o uso de renováveis (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021). Apesar disso, o presente trabalho irá mapear as condições para que o produto seja direcionado ao mercado interno.

Como os projetos de produção de pellets de madeira a partir de biomassa florestal necessitam acompanhar o tempo do ciclo florestal, estes são desenvolvidos com um prazo que possibilite o fornecimento regular da matéria prima. Nesse sentido, para 2023, há expectativa de um aumento de capacidade com o surgimento de novas plantas para

¹⁶ Etanol produzido a partir dos resíduos gerados a partir de resíduos de origem vegetal (EMBRAPA, 2011).

operação, projetadas nos anos anteriores (BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT, 2021).

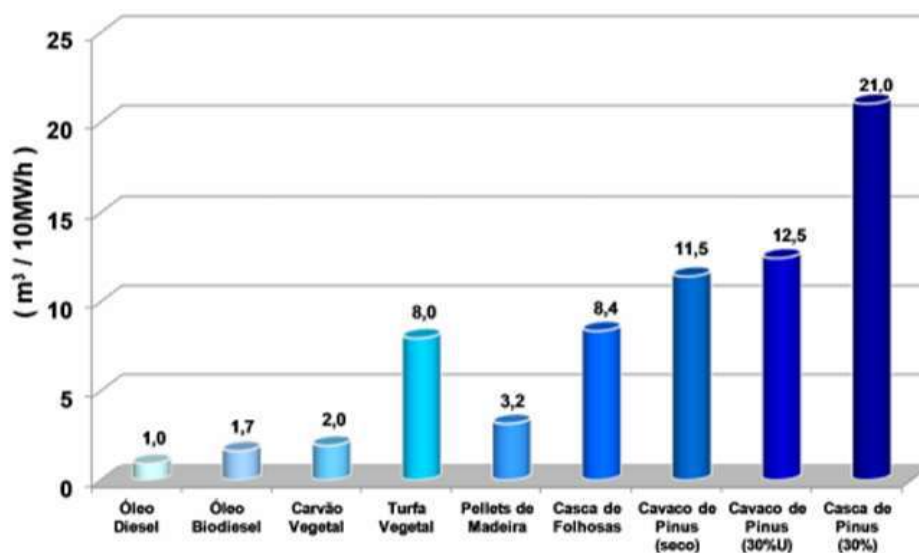
2.7 Pellets de Madeira - Distribuição

2.7.1 Armazenagem

Devido a boa fluidez e boa resistência mecânica aos choques, o manuseio de pellets de madeira não apresenta grandes dificuldades. A elevada durabilidade mecânica reduz a geração de pó durante a armazenagem, proporcionando segurança ao processo, já que a madeira em partículas finas possui característica explosiva (HEINIMO; JUNGINGERB, 2009). Para prolongar a durabilidade do produto é indicado o armazenamento em lugares secos (DOLZAN et al., 2006).

Uma das vantagens relacionadas ao uso de biomassa adensada é a elevada densidade do material, que associada a uma umidade reduzida, proporciona uma maior concentração da fonte energética em menor espaço físico. Dorival Garcia (2012), professor da Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, elaborou um gráfico sobre o volume de cada combustível necessário para gerar 10 MWh de energia. O resultado indicou que os pellets de madeira aparecem em 4º lugar, ocupando menos espaço que outras biomassas não processadas, como é indicado na Figura 16.

Figura 16: Volume ocupado (m^3) por poder calorífico (MWh) por combustível



Fonte: Adaptado de Garcia (2012)

Os pellets de madeira são estocados em silos apropriados e podem ser comercializados a granel ou ensacados em embalagens de 5, 10, 20 e 50 kg. Segundo o “Guia Prático Recomendações de projeto, instalação e operação de armazenamentos de Pellets”, da ENplus®, o armazenamento seguindo as orientações de baixa umidade, ventilação adequada e limpeza periódica, preserva a qualidade do biocombustível. O armazenamento de uma tonelada do produto requer cerca de 1,8 m³ de depósito (ABIB, 2014; KOALA ENERGY, 2022a).

2.7.2 Transporte

O transporte é um fator com grande relevância na viabilidade econômica de projetos industriais para produção dos pellets de madeira. Quanto mais próxima das fontes de matéria prima a unidade produtora estiver, menor será o gasto com a logística de transporte da biomassa florestal. Seguindo a mesma lógica, é indicado que a geradora de energia a partir desse biocombustível esteja localizada próxima a produtora (ABIB, 2014). Isso porque, além de facilitar a conservação das condições de armazenagem durante o trajeto, de antemão, já se sabe que uma quantidade maior de pellets de madeira é necessária na utilização deste biocombustível em substituição aos combustíveis fósseis, como já foi discutido na seção 2.5.2. Dessa forma, o transporte de maior quantidade em massa de material implicará em maior custo logístico e a otimização dele é possível com a redução das distâncias de movimentação do biocombustível. De acordo com o Pellets Atlas (2009), uma distância maior que 60 a 100 km pode tornar o transporte inviável do ponto de vista econômico.

A movimentação de pellets de madeira pode ser feita por meio de rodovia, ferrovia, ou porto, sendo indicado em todos os casos que o transporte seja realizado em ambiente fechado. Uma embalagem utilizada para otimizar a operação de produtos a granel é a chamada Big Bag, que é flexível, resistente - transporta até mil vezes o seu próprio peso com segurança - e econômica. Dessa forma, essa embalagem é comumente utilizada no transporte de pellets de madeira (KOALA ENERGY, 2022b). Sob a ótica ambiental, produtores utilizam com maior frequência o transporte ferroviário e hidroviário, por serem menos poluidores que o rodoviário (QUENO, 2015).

2.7.3 Fluxo de distribuição mundial

Em 2011 ocorreu um dos primeiros marcos para que o pellet de madeira fosse classificado como uma *commodity*, quando houve a criação da primeira bolsa de *commodity* para o biocombustível pela APX Group, que opera no mercado de energia elétrica na Europa, atuando no mercado *spot*, isto é, compra e venda imediata, sem longos prazos de fornecimento. Em paralelo, o porto de Rotterdam desenvolveu sua infraestrutura para operar com pellets de madeira e em conjunto, esses dois fatos incentivaram o mercado internacional como um todo (SCHOUWENBERG et al., 2011; MURRAY, 2011)

Atualmente, o fluxo de distribuição de pellets de madeira possui como principais atores os EUA e o Canadá, sendo esses os países com maior produção mundial comparando individualmente com outros. Segundo a Figura 17, desenvolvida pelo relatório *Bioenergy Europe Pellets Report, 2021*, cerca de 75% da movimentação de exportação é realizada pela América do Norte, sendo a Europa o principal destino do produto.

Figura 17: Distribuição da produção mundial de pellets de madeira em 2020 em %



Fonte: Bioenergy Europe Pellets Report, 2021

Após exposta a contextualização para um projeto de produção de pellets de madeira no Brasil, observam-se oportunidades com elevado potencial. A pesquisa qualitativa pontuou as consequências ambientais da trajetória histórica do setor industrial que resultaram em acordos mundiais com metas para o incremento no uso de biocombustíveis. Nesse sentido, os pellets de madeira com propriedades físico químicas próximas aos combustíveis fósseis possuem competitividade no mercado de geração de energia limpa. O foco mercadológico dado nos últimos capítulos dessa seção teve como objetivo apresentar as condições de contorno necessárias para a produção e comercialização desse biocombustível que serão essenciais para o desenvolvimento da análise de viabilidade.

3 Metodologia

Este capítulo tem como objetivo detalhar os métodos que foram utilizados para a obtenção dos dados e as estimativas necessários para a estruturação da Demonstração do Resultado Financeiro (DRE) e do Fluxo de Caixa (FC), para os cálculos de viabilidade econômica do projeto dentro do cenário que será definido para a análise. Nove seções compõem o capítulo, iniciando com a estratégia escolhida para definir a localização da planta, considerando as dimensões continentais do território brasileiro. A seção 2 apresenta a metodologia de estimativa do investimento, a partir da adaptação do cenário base publicado na literatura utilizada como modelo. Em seguida, a seção 3 trata dos custos de produção envolvidos, a 4 do preço de venda praticado sobre o produto e adotado para este estudo e a 5 das despesas operacionais. A partir da seção 6, serão descritos os conceitos comumente utilizados para uma avaliação mais objetiva dos resultados econômicos – fluxo de caixa, valor presente líquido, taxa mínima de atratividade, taxa interna de retorno, *payback* descontado e ponto de nivelamento. O capítulo se encerra com a apresentação de análises de sensibilidade como forma de prever variações do cenário escolhido e seu impacto na viabilidade do projeto.

3.1 Localização do projeto

O local projetado para a implementação de uma indústria é de elevada importância para a estruturação dos custos e receitas. Isso porque o preço das matérias-primas e utilidades, em geral, variam de acordo com a localidade. Essa variação pode ocorrer principalmente devido a disponibilidade dos produtos, infraestrutura logística, fatores de competitividade e impactos socioambientais.

Weber, em 1929, publicou a Teoria de Localização que auxilia na tomada de decisão do local, de maneira mais objetiva. Ela se baseia na análise dos pesos associados ao processamento, comparados ao mercado consumidor. Para isso, considera-se o Índice Material (IM), como a razão entre a massa de matéria-prima (MP) consumida e a massa de produto gerada (P). O Peso Locacional (PL) será o IM somado a uma unidade. As Eq. (2) e Eq. (3) indicam tais relações.

$$IM = MP/P \tag{2}$$

$$PL = IM + 1$$

(3)

De forma lógica, quanto maior o PL, maiores as perdas durante o processamento, logo, maior atração para a planta ser instalada próxima às fontes de insumos. O contrário já indica uma baixa perda no durante o processo, tornando-se mais interessante a produção próxima ao mercado consumidor.

3.2 Investimento

O estudo sobre investimento em um projeto possui o objetivo de gerar estimativas sobre o capital total necessário para a sua implementação. A partir delas é possível estruturar melhor o financiamento, seja por capital próprio ou financiado por terceiros. Segundo o critério descrito por Chiavenro (2003), ele pode ser dividido entre investimento fixo, definido como conjunto de bens materiais e imateriais vinculados ao projeto, e capital de giro, necessário para o atendimento de operações e comercializações.

3.2.1 Investimento fixo

O investimento fixo (IF) é a parcela que contém todos os recursos necessários para a obtenção e instalação de equipamentos requeridos pelo projeto. É composto principalmente pela compra, frete e instalação de equipamentos, custos para a alocação do terreno da fábrica, infraestrutura, engenharia, montagem, geração e distribuição de utilidades, tancagem e estocagem de materiais, tratamento de efluentes e instalações complementares. Custos de engenharia, contingência, tecnologia e de cargas de partida também podem ser adicionados de acordo com a maturidade do projeto. Em projetos essencialmente químicos ele pode ser dividido entre *Inside Battery Limits* (ISBL) e *Outside Battery Limits* (OSBL), que basicamente dividem os bens entre ligados diretamente a reação principal para obtenção do produto e equipamentos também necessários, porém indiretos a ela (TOWLER; SINNOTT, 2008). Como a produção de pellets de madeira não envolve reação química, sendo um processo principalmente mecânico, essa divisão não é aplicável.

A estimativa do investimento fixo é obtida parte com consultas a fornecedores, de acordo com as condições do projeto, e parte a partir de equações que relacionam algumas parcelas a outras, segundo a literatura. Para este trabalho, a estrutura desse investimento

feita pelo modelo desenvolvido por Pirraglia e al. (2010) foi replicada adicionando as devidas adaptações de cenário, localidade, ano e moeda, que serão explicadas nos próximos itens. Vale ressaltar que o modelo prevê a realização do IF diluída em três anos, iniciando com 20% no ano 0, seguido por 40% no ano 1 e 40% no ano 2. Dessa forma, a capacidade de operação apenas se inicia no ano 3, sendo o primeiro ano de produção.

Os equipamentos que Pirraglia et al. (2010) avaliaram como necessários ao projeto de produção de pellets de madeira nos EUA com estimativas realizadas em 2019 foram: Transportadores e equipamentos diversos; Carregador frontal; Moega; Secador, queimador e sistema de ar; Moinho de martelo; Silo de fundo dinâmico; Peletizadora; Resfriador; Peneira agitadora; *Boiler* (potência de 800 KWh); Terreno e preparação dele; Pavimentação, sistema de recebimento e área de carregamento; Silo e sistema para ensacamento; Empilhadeira; Edifício e escritório administrativo. A capacidade em t/h de cada equipamento foi mapeada. A planta do modelo assumiu operação 50 semanas/ano, sete dias/semana, com três turnos/dia, totalizando 8.400h/ano, assumindo 112h/ano dedicada à manutenção e inesperadas paradas. Tendo em vista essas horas de operação para a produção de 75.000t/ano, o número de equipamentos requeridos foi calculado. O custo unitário por equipamento foi obtido com fornecedores, bem como o custo de instalação para os mesmos. O investimento associado à armazenagem foi definido como 7,6% do custo do edifício e escritório administrativo. Um montante dos custos de equipamentos e armazém chamado de total das unidades industriais foi obtido e custos indiretos foram adicionados como 24% deste valor. Por fim, 10% do total das unidades foi adicionado como custo de contingência, representando os custos com peças de reposição para substituição de equipamentos não conformes com o esperado tecnicamente.

Neste trabalho, foi escolhida a comercialização do produto a granel, logo equipamentos do modelo associados ao ensacamento foram desconsiderados, sendo eles o Silo e sistema para ensacamento e a Empilhadeira. A modalidade de venda adotada foi de preço FOB, isto é, o comprador dos pellets de madeira será responsável pela retirada do produto na planta onde ele foi produzido (Incoterms, 2020). Seguindo as indicações do ponto de vista ambiental, a movimentação por ferrovia seria indicada para o projeto e o carregamento dos vagões poderia ser realizado pela moega que já foi prevista para estocar os produtos nos silos. Como o modelo não descreve explicitamente o que inclui os custos indiretos, mas informa que eles são necessários para as unidades industriais,

considerando uma premissa conservadora adotada neste trabalho, essa parcela foi mantida. Além disso, custos de engenharia, tecnologia e de partida são geralmente utilizados em projetos e a análise sobre a necessidade deles neste projeto foi avaliada segundo as premissas a seguir. Todos os outros itens do modelo foram considerados.

Custos de engenharia estão relacionados ao desenvolvimento e implementação de tecnologias e equipamentos que ainda não são dominados pelos profissionais da área. Pirraglia et al. (2010) não consideraram essa parcela em suas estimativas. Apesar disso, adotando uma postura mais conservadora, neste trabalho foi adicionado 12% do investimento total das unidades industriais, como indicado por Chauvel e Lefevbre (1989).

Licenças de utilização, manuais de operação e pagamento de *royalties* entram nos custos de tecnologia, podendo variar de 5 a 10% do total das unidades (CHAUVEL et al., 1989). Embora essa parcela não tenha sido considerada por Pirraglia et al. (2010), novamente, foi adotada uma postura mais conservadora, adicionando a fração de 5%.

Já os custos de partidas referem-se às despesas para funcionamento inicial da planta antes da geração de receita. Eles possuem como objetivo prever o custo variável durante o período inicial de adequação das especificações técnicas do produto, para que o mesmo possa então gerar receita de venda. Chauvel e Lefevbre (1989) afirmam que para tecnologias da indústria química maduras esse período inicial é de três meses. Como o processo deste trabalho é mecânico e com pouca complexidade tecnológica, será considerado um mês como período para formação da parcela de custos de partida neste trabalho.

3.2.2 Ajustes de estimativa

Como cada estudo para a estruturação de um projeto parte de premissas de capacidade, tempo e localização, estratégias para realizar modificações nesses cenários e obter estimativas coerentes são utilizadas. Fatores de extrapolação, de atualização no tempo e de nacionalização atuam com essa finalidade de modo a atingir estimativas mais precisas.

3.2.2.1 Fator de extrapolação

A relação entre capacidade de produção e o investimento fixo necessário para tal segue naturalmente um mesmo sentido, já que quanto mais produtos são fabricados, maior é o custo unitário associado. Entretanto, esse ajuste não é linear devido a ganhos de escala, principalmente ligados aos custos fixos, que acabam sendo diluídos na maior capacidade de produção. Alguns projetos são beneficiados de forma mais expressiva por essa economia, como é o caso da produção de produtos químicos, e para outros, essa parcela não é muito relevante devido a limitações operacionais, como é visto em processos mecânicos (POSSAS, 1993; SZWARCFITER, 1997).

Um estudo desenvolvido por Amanda Lang, para a empresa de consultoria Forisk em 2022, indicou que as capacidades das plantas norte-americanas variam entre cerca de 10.000t/ano e 600.000t/ano. Considerando que no Brasil a produção de pellets de madeira ainda se encontra em fase menos desenvolvida que nos EUA, como foi apresentado nas seções 2.6.2 e 2.6.3 associado ao volume base de 75.000t do cenário base de Pirraglia et al. (2010), o volume de produção previsto neste trabalho seguirá o modelo base. Logo, não será necessário o uso de um fator de extrapolação.

3.2.2.2 Fator de atualização no tempo

A volatilidade natural dos preços de produtos, materiais e equipamentos torna necessário a utilização de um fator de correção sobre o investimento fixo previsto em um ano diferente do adotado para a construção. Índices para a indústria química foram desenvolvidos por entidades reconhecidas como o *Chemical Engineering INDEX* (CEPCI), publicado pela revista *Chemical Engineering*. Já para a construção civil, o Corpo de Engenheiro do Exército dos EUA publica anualmente o *Civil Works Construction Cost Index System* (CWCCIS), divulgado por estado dos EUA, a média desses valores fornece o índice nacional. O modelo de Pirraglia et al. (2010) utilizou esse segundo índice, por ser mais coerente aos equipamentos para um projeto de produção de pellets de madeira. A aplicação desse índice para atualização no tempo segue a Eq. (4) a seguir.

$$I_Y = I_X * (A_Y/A_X)$$

(4)

Onde,

- I_Y : Investimento fixo estimado no ano de construção da planta
- I_X : Investimento fixo conhecido no ano de cenário base
- A_Y : Índice no ano de construção da planta
- A_X : Índice no ano de cenário base

O CWCCIS nacional foi o índice empregado neste trabalho com o objetivo de atualizar o cenário base de 2009 de Pirraglia et al. (2010), para um projeto futuro, utilizando o índice de 2020, ano mais recente em que o referido índice foi encontrado.

3.2.2.3 Fator de conversão da moeda

As estimativas de investimento desenvolvidas por Pirraglia et al. (2010) foram realizadas em dólares, moeda local dos EUA. Como o projeto deste trabalho visa a produção e comercialização no mercado interno brasileiro, a conversão da moeda para reais é necessária. Essa transformação será feita a partir da taxa de câmbio. O Banco Central do Brasil divulga cotações e boletins em dias comerciais das taxas oficiais de compra e venda de dólares americanos a partir de reais. Dessa forma, taxas médias das cotações publicados em 2021 dos valores de compra e venda serão gerados. Para o ajuste das estimativas que compõem o investimento fixo, a média dos valores de compra será utilizada neste trabalho.

3.2.2.4 Fator de nacionalização

Quando informações sobre o investimento de plantas estão disponíveis apenas alocadas em países distintos do projetado, fatores de nacionalização são empregados para adaptação. Esses índices consideram as diferenças na produtividade e custos dos funcionários, commodities, tributos, necessidade de importação de alguns materiais entre outros elementos. Towler e Sinnot (2008) estudaram a diferença de perfil entre Brasil e Estados Unidos e encontraram 1,14 como fator de nacionalização de um projeto realizado inicialmente no segundo país, mas projetado para o primeiro. Como o estudo de Pirraglia et al. (2010) foi feito para plantas nos EUA, esse índice foi utilizado na nacionalização do projeto industrial de produção de pellets de madeira no Brasil.

3.2.3 Capital de giro

O capital de giro é um recurso necessário para operacionalização de uma planta industrial, ao fornecer liquidez para o sistema. Ela é essencial para sustentar o ciclo operacional que envolve a disponibilidade de caixa para compra de matérias primas, estoque, produção, vendas a créditos e cobranças. Towler et al (2008) indicam que 15% do total de investimento para as unidades industriais é uma boa estimativa para o capital de giro, sendo essa a premissa adotada neste trabalho.

3.3 Custos de produção

Os custos de produção envolvem todo o capital necessário para a preparação e produção de um bem ou serviço a ser comercializado. Eles são divididos entre variáveis e fixos. A primeira classificação é função do volume produzido e a segunda é independente do volume produzido em determinado intervalo de tempo.

3.3.1 Custos variáveis

Os custos variáveis incluem basicamente matérias-primas, energia, utilidades, embalagens ou qualquer outro insumo necessário para a produção. São valores proporcionais a quantidade de produto desejada, de elemento consumido por produto e ao custo unitário do insumo envolvido. Em alguns casos, existem elementos redutores de custo, quando um material ou utilidade é produzida paralelamente ao produto principal e também é capaz de gerar receita de venda. O custo variável unitário do produto será composto pelo somatório dos gastos com matérias primas consumidas menos a receita de venda gerada pelos subprodutos, quando existirem. Dessa forma, cada insumo irá contribuir com uma porcentagem do total do custo variável unitário e por isso, a análise de volatilidade de cada um deles é importante para avaliar a sensibilidade do projeto.

Na produção de pellets de madeira, sem adição de agente ligante, a matéria prima necessária é a madeira na sua forma direta ou como resíduos. No caso deste trabalho, a madeira escolhida para avaliação é de toras de Eucalipto e Pinus, espécies com maior representatividade econômica no território brasileiro, como foi descrito na seção 2.4.3.2. A formação de subprodutos não foi mapeada. A quantidade de madeira necessária para produzir 75.000t/ano de pellets de madeira baseou-se no modelo de Pirraglia et al. (2010).

A partir do cálculo retroativo da massa seca presente no produto final, que se mantém constante ao longo de todo o processo, somou-se a umidade adicional presente em cada etapa até a alimentação do fluxograma. Como esses cálculos também são necessários para a definição de localização do projeto, eles já serão realizados no item 4.1 e os valores obtidos serão contabilizados no item 4.4 referente ao resultado do custo de produção.

Idealmente, seria preciso realizar uma pesquisa de mercado com fornecedores de material com teor de umidade de 55%, como prevê o modelo base de Pirraglia et al. (2010), porém devido à dificuldade em obter esse valor com exata precisão em *Marketplaces online*¹⁷ sem a definição de um projeto, uma estimativa considerando a localidade do projeto será utilizada.

Além da matéria prima, outro custo variável é a energia elétrica. Segundo o modelo de Pirraglia et al. (2010), o consumo anual para uma planta de 75.000t de pellets de madeira é de 41.430.066,24 kWh/ano. Para obter o valor do consumo da planta no Estado escolhido, é necessário buscar na companhia de distribuição de eletricidade o valor em R\$/kWh e a partir da multiplicação pelo consumo anual, obter o custo anual dessa utilidade. No Brasil, é comum a divulgação de valores em R\$/kWh de acordo com o consumo de tensão da unidade por parte das empresas responsáveis pela distribuição de energia elétrica. A divisão de acordo com o consumo é representada por grupos e as indústrias ficam alocadas no grupo A, considerando a maior demanda de energia (KIKUMOTO, 2019).

Apesar do modelo base de Pirraglia et al. (2010) adicionar os custos com sacos, paletes, suportes e empilhadeira, este trabalho não irá considerar tais custos, pois este projeto de produção de pellets de madeira tem como cenário de comercialização a modalidade a granel.

Além da geração do produto principal, devido a origem vegetal dos pellets de madeira, o uso desses biocombustíveis em substituição a combustíveis fósseis também gera créditos de carbono. Como uma certificação eletrônica gerada quando há uma redução efetiva de emissões de GEE, os créditos de carbono são formados e vendidos, gerando receita para os consumidores de energia renovável. Dessa forma, em mercados onde essa comercialização já é legislada, a venda de pellets de madeira deve levar em

¹⁷ Plataforma que reúne diversos fornecedores em um mesmo ambiente virtual e online de vendas (NETO, 2022)

consideração o ganho que o consumidor terá. Logo, um prêmio adotado pelo produtor sobre o preço de venda é justificado e aderido pelo mercado spot (CREDCARBO, 2022).

No Brasil, essa comercialização ainda não é regulamentada. Em maio de 2022, o Governo Federal publicou um decreto para iniciar a regulamentação do mercado de crédito de carbono no país, evidenciando o enorme potencial do país e com foco na exportação. O decreto também comenta sobre o desenvolvimento do mercado de crédito de carbono florestal, gerado durante o processo produtivo de propriedades rurais, promovendo mais uma fonte de renda para o produtor de pellet de madeira (GOMES, 2022). Como esse decreto encontra-se ainda em andamento, o presente trabalho não irá considerar esse ganho para a indústria produtora de pellets de madeira.

3.3.2 Custos fixos

Os custos fixos totais incluem mão-de-obra, manutenção, custos gerais da planta, seguro, taxas entre outros itens necessários para a produção não variáveis, os quais não variam com a quantidade produzida. É possível obter o custo fixo unitário por unidade de produto a partir da razão entre o valor total por período e a quantidade produzida, gerando um valor que depende do volume produzido.

São divididos entre custos desembolsáveis, quando geram saída no caixa, e não desembolsáveis, quando uma saída de caixa não é observada.

Dentre os custos desembolsáveis há uma divisão entre custos diretos e indiretos, sendo o primeiro constituído de parcelas que se relacionam diretamente com a produção em si, e a segunda por itens que são debitados devido a outras atividades da planta. Na primeira classificação entram itens como mão-de-obra de operação (MOP), supervisão e chefia, cargos de laboratório, manutenção e *overheads* diretos gerais. Já na segunda, impostos, seguros e *overheads* indiretos gerais (Peter et al., 2003)

O modelo de Pirraglia et al. (2010) prevê a necessidade por turno de quatro operadores, dois supervisores, dois técnicos de manutenção e dois operadores de empilhadeira, além dos cargos administrativos compostos por um profissional de *marketing* e vendas, um diretor executivo, um diretor financeiro e um contador. No cenário deste projeto, os operadores de empilhadeira não são necessários. Apesar da possível replicabilidade dos cargos no Brasil, um cálculo sobre o custo associado a cada um dos funcionários é complexo, pois além de uma média do salário bruto, as

individualidades de contratação no país, como impostos, benefícios e previdência, deveriam ser incluídas. Por este motivo, não foi considerado o custo de mão-de-obra indicado no caso base de Pirraglia et al. (2010).

Peter, Timerhaus e West (2003) desenvolveram uma estimativa dos custos desembolsáveis de um projeto para a indústria química a partir do custo total de produção (CTP), isto é, o custo variável para um ano de operação em 100% da capacidade, somado ao custo fixo desembolsável. Esta metodologia de cálculo será utilizada no presente trabalho. A Tabela 8 abaixo descreve essas relações.

Tabela 8: Estimativa da formação de custos desembolsáveis

	Item	Formação do custo
Custos desembolsáveis diretos	Mão-de-obra de operação (MOP)	10% CTP
	Supervisão e chefia	10% MOP
	Cargos de laboratório	10% MOP
	Manutenção	4% ISBL ou 4%(60%IF)
	Overhead diretos gerais	45% MOP
Custos desembolsáveis indiretos	Impostos e seguros	1,5% IF
	Overhead indiretos gerais	65% (MOP+Manutenção)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Peter, Timerhaus e West (2003)

Como o projeto de pellets de madeira não se enquadra na divisão ISBL e OSBL, como foi explicado na seção 3.2.1, a fórmula para obtenção do custo com manutenção será aproximada considerando a relação de Towler e Sinnott (2008) de que o ISBL corresponde a cerca de 60% do IF. Logo, o cálculo para o custo com manutenção será realizado como 4% de 60% do IF.

Devido ao fato dos itens do CF desembolsável estarem em função do valor total do CTP, é preciso montar uma equação dependente apenas dele como incógnita para chegar aos valores desejados. Isso será realizado pela distribuição do CF desembolsável entre parcelas dependentes do CTP e valores nominais. Sendo o custo variável anual uma parcela nominal, a Eq. (5) a seguir será solucionada obtendo o valor de CTP e conseqüentemente, cada item do CF desembolsável.

$$CTP = Valor\ nominal\ do\ CV\ anual + (Parcela\ dependente\ de\ CTP + Parcela\ nominal)_{CF\ DESEMBOLSÁVEL} \quad (5)$$

A depreciação é considerada como um custo fixo não desembolsável. Ela representa a redução do valor dos bens em decorrência de desgaste ou perda de utilidade pelo uso, ação da natureza ou obsolescência (HOTELLING, 1925). Existem vários métodos para o cálculo de depreciação e o utilizado pelo modelo de Pirraglia et al. (2010) foi o *Modified Accelerated Cost Recovery System* (MACRS), sob a classe *7-year property*.

O MACRS é um método estadunidense não linear que tem como objetivo eliminar as incertezas em um projeto ao atribuir valor nulo ao final da vida útil do bem, isto é, sem considerar valor residual. Ele define uma distribuição de percentual para a perda de valor de um bem a cada ano, de acordo com sua vida útil pré-definida. Esse período considera a convenção estadunidense de *half-year* no primeiro e último ano, com apenas 6 meses de operação. Dessa forma, a classe *7-year property* possui itens com 7 anos de vida útil, mas distribuição de percentual de depreciação em 8 anos corridos. Essa metodologia de depreciação foi desenvolvida pelo *Internal Revenue Code* por meio da observação do perfil de redução do valor do bem, sendo mais intensa nos primeiros anos e mais suave nos últimos. Tabelas são disponibilizadas e atualizadas pelo código estatal e os dados utilizados por Pirraglia et al. (2010) segue a distribuição da Tabela 9 a seguir (IRS, 2021).

Tabela 9: Distribuição do percentual de depreciação MACRS-7

Ano de operação	1	2	3	4	5	6	7	8
Operação em meses	6	12	12	12	12	12	12	6
Percentual para cálculo de depreciação em 7 anos totais	14,29%	24,49%	17,49%	12,49%	8,93%	8,92%	8,93%	4,46%

Fonte: IRS, 2021

No Brasil, esta metodologia é semelhante ao método de Soma de Dígitos, que considera a vida útil total e realiza a depreciação não linear e de forma proporcional ao tempo de vida restante (CAPITAL NOW, 2019b)

Com o objetivo de adaptar a estrutura de custos seguindo características do projeto no Brasil, será utilizado o período de 10 anos para a vida útil dos equipamentos, baseado na recomendação da Receita Federal Brasileira (1998). A Tabela 10 apresenta a distribuição anual para o cenário ajustado de 10 anos.

Tabela 10: Distribuição do percentual de depreciação MACRS-10

Ano de operação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Operação em meses	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6
Percentual para cálculo de depreciação em 10 anos totais	10,00%	18,00%	14,40%	11,52%	9,22%	7,37%	6,55%	6,55%	6,56%	6,55%	3,28%

Fonte: IRS, 2021

O cálculo da parcela de depreciação será realizado pelo valor do bem vezes o percentual referente ao ano, segundo a Eq. (6) . Ele será aplicado a todos os equipamentos que foram descritos na seção 3.2.1 de investimento fixo. Vale ressaltar que o valor dos bens deve considerar que a depreciação no ano 1 e no ano 11 ocorre apenas em 6 meses.

$$\text{Depreciação anual} = \text{Valor do bem} * \text{Percentual do período}$$

(6)

3.4 Preço médio de venda do produto

Os preços de vendas do produto e de subprodutos, caso sejam formados, são importantes durante a análise de viabilidade econômica, pois a partir deles são geradas receitas de venda, representando a maior entrada do projeto, salvo poucas exceções. Conforme os produtos passam a ser negociados internacionalmente, eles são incluídos nas análises realizadas por empresas especializadas em acompanhar a evolução dos preços negociados e publicá-los em arquivos.

A revista que será utilizada para obtenção do preço médio dos pellets de madeira neste trabalho será a Argus Energy. Ela é uma companhia de origem britânica que fornece informações comerciais sobre o setor energético desde 1970. A publicação que mapeia o mercado de pellets de madeira é chamada de *Argus Biomass Markets* e é publicada semanalmente, às quartas-feiras (ARGUS MEDIA®, 2022). Como até o momento do desenvolvimento deste trabalho não há um índice para o produto brasileiro, o preço FOB do produto com uso industrial no sudeste americano será utilizado. O nome do índice é *US fob export price (industrial wood pellets) – Origin fob southeast US - Spot*. Com o objetivo de reduzir o efeito de eventos pontuais, sejam de alta ou queda, uma média anual das publicações entre 18 de agosto de 2021 e 20 de julho de 2022 será utilizada.

Como o preço é publicado em dólares por tonelada, a taxa de câmbio de venda média publicada pelo banco central de 2021, descrita na seção 3.2.2.3, será aplicada.

Durante a análise de sensibilidade, que será melhor descrita na seção 3.10, prêmios positivos e percentuais de redução serão utilizados e o resultado será analisado.

3.5 Despesas operacionais

Além dos custos de produção, existem outros gastos associados a um projeto não ligados diretamente à operação. Segundo Peter, Timmerhaus e West (2003) descrevem esses gastos como despesas administrativas, comerciais e aplicados em pesquisa e desenvolvimento (P&D).

As despesas administrativas estão relacionadas com as áreas de apoio da empresa. Ela é gerada devido ao pagamento de salários de executivos, funcionários do setor jurídico, de suporte e controladoria, manutenção do terreno e escritório administrativos, recursos humanos, área de comunicação externa e interna, entre outros gastos administrativos aplicáveis ao projeto. Uma faixa de 15 a 25% do MOP é normalmente observada em indústrias químicas (FREITAS, 2021). Logo, neste trabalho o valor médio de 20% do MOP será utilizado.

Comissões dadas em função de vendas efetuadas aos funcionários do setor comercial, promoções, descontos, gastos com publicidades e propagandas sobre o produto também devem ser previstos. O modelo de Pirraglia et al. (2010) mapeou esses gastos e chegou ao valor de US\$ 6/t de pellets de madeira. A transformação desse valor em dólares para reais considerou a média da taxa de câmbio de compra divulgada pelo banco central no ano 2021, descrita na seção 3.2.2.3.

Por último, para completar a parcela de despesas operacionais, uma porcentagem das receitas geradas em um projeto deve ser direcionada para pesquisa e desenvolvimento, visando desenvolver produtos ou processos com estratégias de inovação. Segundo a ANP (2020), produtoras de petróleo e gás natural devem investir 1% de suas receitas brutas em pesquisa, desenvolvimento e inovação. Como este trabalho também se encontra ligado ao setor energético, essa porcentagem de 1% das receitas de vendas será utilizada.

3.6 Demonstrativo de Resultados de Exercício, Fluxo de Caixa e Valor Presente Líquido

Na avaliação de projetos industriais, a elaboração do Demonstrativo de Resultado de Exercício (DRE) é importante para que a partir do lucro líquido, a parcela de imposto de renda seja calculada. (UDÍCIBIUS et al., 2010).

Com o lucro tributável calculado, é possível aplicar a porcentagem referente ao Imposto de Renda Federal, cobrado pelo governo federal brasileiro. Essa tarifa pode variar de acordo com o setor de atuação, mas a alíquota média divulgada pela Receita Federal é de 34%, sendo 25% devido ao Imposto de renda sobre Pessoas Jurídicas (IRPJ) aplicado a lucros que excedem R\$20.000,00/mês (RECEITA FEDERAL, 2015a) ou 15% quando abaixo desse valor, somados a 9% referente a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) (RECEITA FEDERAL, 2015b). Vale ressaltar que essa parcela só é cobrada quando o resultado é positivo.

A utilização de Fluxo de Caixa (FC) funciona como uma ferramenta de organização do caixa por meio do resultado entre o montante gerado e os gastos consumidos. Assim como no DRE, é preciso definir um período de tempo para análise sobre como se comporta o fluxo de caixa. Geralmente são analisados anualmente, condensando todas as entradas e saídas ao final dos anos (OLIVEIRA, 2008).

Nesse projeto, as parcelas de investimento via capital próprio, custo de produção, despesas operacionais, investimento fixo, capital de giro e imposto de renda formam as saídas. Já as receitas de vendas e o capital de giro recuperado constituem as entradas. Quando são utilizados financiamentos para o investimento, parcelas de amortização e juros também formam as saídas.

Para uma análise de viabilidade, faz-se necessário definir uma taxa de retorno mínima ou taxa mínima de atratividade (TMA). A taxa mínima de atratividade, como o próprio nome já sugere, representa o percentual mínimo que um investidor deseja obter como retorno do investimento realizado. Ela indica a menor taxa necessária para que o investidor deixe de depositar seu patrimônio em aplicações de menor retorno, porém baixo risco, para investir em um novo projeto. Dessa forma, os principais fatores que

influenciam a TMA são risco, custo do capital¹⁸, custo de oportunidade¹⁹, limitações de recursos financeiros e conjuntura econômica tanto a nível nacional, como internacional (CAPITAL NOW, 2020).

Quanto maior o risco associado à concretização de um projeto, maior é o retorno exigido pelo investidor, logo, maior a TMA adotada. No modelo de Pirraglia et al. (2010) a TMA foi de 12%. Como no Brasil, a produção de pellets de madeira ainda é iminente, buscou-se uma taxa de retorno maior. A taxa mínima de atratividade escolhida foi a dos títulos de Tesouro Direto Selic, que possuem uma boa rentabilidade, simples aplicação com liquidez diária e segurança por ser um programa do Tesouro Nacional (TESOURO NACIONAL, 2022a). O valor percentual dessa aplicação prefixada em é de 13,09% e esse será o valor utilizado neste trabalho, sem considerar adicionais de risco (TESOURO NACIONAL, 2022b).

Dessa forma, para trazer os FC de anos futuros ao ano zero, essa taxa deve ser descontada. A Eq. (7) a seguir descreve como calcular o valor presente (VP) que deve ser aplicado a cada FC, obtendo os fluxos de caixa descontados (FCD_n).

$$VP = \frac{VF}{(1 + TMA)^n} \quad (7)$$

Onde,

- n: Ano do Fluxo de Caixa analisado;
- VF: Valor do Fluxo de Caixa no ano “n”;
- VP: Valor do Fluxo de Caixa no presente;
- TMA: Taxa de retorno mínima ou taxa mínima de atratividade.

O horizonte de planejamento deste projeto para análise da viabilidade considerará 11 anos corridos de operação, com 6 meses no ano 1 e no ano 11, totalizando 10 anos. Essa escolha considerou a vida útil dos equipamentos no Brasil, como foi descrito no item 3.3.2.

¹⁸ Custo necessário para a captação de recursos financeiros para uso interno por parte da empresa (CAPITAL NOW, 2019a).

¹⁹ Custo associado a renúncia de uma oportunidade, tendo em vista a possibilidade de ela ter sido revertida em lucro (CAPITAL NOW, 2019a).

Ainda que cada ano possua sua especificidade, um projeto visa o resultado acumulado esperado após determinado intervalo. Logo, a análise de viabilidade deve considerar o somatório dos valores presentes no horizonte considerado. A Eq. (8) a seguir descreve esse somatório, chamado de valor presente líquido (VPL).

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{FCD_n}{(1+TMA)^n} \quad (8)$$

Onde,

- n: Ano do Fluxo de Caixa analisado;
- N: Número de anos do horizonte planejado;

O VPL é uma ferramenta importante de avaliação de viabilidade econômica de um projeto. Ele apresenta o resultado de um projeto, comparado ao investimento direto do montante com o retorno da TMA. Um VPL maior que zero representa que o investimento no projeto é economicamente viável e menor que zero não economicamente viável.

3.7 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que zera o VPL. Ela indica o limite de viabilidade econômica, bem como a margem de segurança em relação à taxa de desconto. Uma TIR maior que a TMA indica viabilidade econômica, e o contrário, a inexistência dela.

O cálculo algébrico dela pode ser feito resolvendo a Eq. (8), mantendo o VPL igual a zero e buscando a TMA como incógnita. No software Excel há uma função “TIR” que ao alimentar os dados de Fluxo de Caixa em cada ano “n”, retorna a referida taxa de desconto.

3.8 *Payback* descontado

O termo *Payback* vem da língua inglesa e se traduz em tempo de retorno do investimento. Ele corresponde ao período necessário para que o investidor tenha o retorno do capital investido no início do projeto. Ele é avaliado de forma acumulada ao longo do horizonte de tempo do projeto. No momento em que o saldo deixa de ser negativo e passa

a ser nulo, o investidor obtém o retorno. A partir desse momento, os períodos seguintes geram lucro acumulado. Assim como ocorre na avaliação do FC, para que o *Payback* considere a dinâmica de tempo, é necessário que a taxa de desconto seja utilizada nos cálculos. Dessa forma, para encontrar o valor de “n” exato em que o saldo muda de sinal é preciso calcular o FCD acumulado ano a ano. Caso o resultado não dê um número inteiro, será preciso interpolar entre os dois anos em que ocorre a mudança de sinal.

3.9 Ponto de nivelamento de caixa

Outro índice que auxilia no processo de decisão sobre a implantação de um projeto é o *Break Even Point* em inglês, também chamado de ponto de nivelamento. Ele se refere ao ponto onde as receitas se igualam aos custos de produção, especificado pela quantidade de produto que propicia esse resultado (PETER, TIMMERHUAS E WEST, 2003). A Eq. (9) indica a igualdade buscada nesse ponto.

$$CTP = RC \tag{9}$$

Onde,

- CTP: Custo total de produção;
- RC: Receita de vendas.

O CTP se divide entre os custos variáveis e fixos, e a RC é o produto de preço e volume de venda, como é mostrado na Eq. (10)

$$CV_u * Q + CF = P * Q \tag{10}$$

Onde,

- CV_u : Custo unitário variável;
- CF: Custo fixo;
- P: Preço de venda;
- Q: Quantidade de produto fabricado.

Isolando a quantidade de produto fabricado para encontrar o ponto de nivelamento, tem-se a Eq. (11).

$$Q = \frac{CF}{P - CV_u}$$

(11)

A partir da análise desse resultado, é possível entender melhor os limites de viabilidade do projeto, além de tentar buscar alternativas para contornar cenários não favoráveis do ponto de vista operacional. Dessa forma, o presente trabalho irá calcular o ponto de nivelamento para mapear o limite mínimo de venda de produto anualmente para que os custos sejam compensados pela receita de venda.

3.10 Análise de sensibilidade

A realização de estimativas para construção do fluxo de caixa gera incertezas em relação às variáveis operacionais. Nesse sentido, as análises de sensibilidade são importantes para a previsão de possíveis limites de viabilidade em cenários distintos, bem como para identificar as variáveis que mais afetam o resultado de viabilidade. Os impactos de algumas variações de determinados parâmetros serão mapeados por meio da avaliação da TIR em cada cenário variado. Quando a TIR estiver abaixo da TMA assumida, a variação representa um sinal de inviabilidade, caso haja um elevado risco de ela ocorrer.

As escolhas para sensibilização dos parâmetros serão definidas na seção 4.9, de acordo com os resultados obtidos ao longo do capítulo 4.

4 Resultados e Discussões

Esse capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos a partir do emprego da metodologia descrita no capítulo 3. A primeira seção apresenta os cálculos da Teoria de Weber (1929) para a tomada de decisão sobre a localidade de instalação da planta deste trabalho. Com isso, o cenário do projeto será concluído e descrito de forma resumida na seção 4.2. Em seguida, os resultados sobre o investimento total, custo de produção, preço de venda e despesas operacionais serão apresentados. A partir desses resultados, serão construídos o DRE e o Fluxo de Caixa e calculados os índices de VPL, TIR, *Payback descontado* e ponto de nivelamento de caixa. Os valores obtidos em cada uma dessas quatro métricas serão importantes para a avaliação da viabilidade econômica do projeto. Na seção seguinte o objetivo é apresentar os resultados de sensibilidade a partir da variação de alguns parâmetros do cenário e identificar o quão sensível é a TIR quando algumas alterações ocorrem na prática.

4.1 Localização do projeto

A produção de pellets de madeira é definida como processo aberto na análise do balanço material, já que ocorre transferência de massa da água ao longo das etapas. Com isso, apesar da peletização ser classificada majoritariamente como um processo mecânico, a relação entre a madeira em tora e o pellet produzido a partir dela, não é de um para um. Segundo Qian e Mc Dow (2013), nos Estados Unidos, a média é de uma tonelada de pellets de madeiras fabricados a partir de duas toneladas de fibras de madeira verde. Para analisar essa proporção nas condições do projeto no Brasil, utilizando madeira do gênero Eucalipto, é preciso realizar cálculos considerando a umidade inicial da matéria prima escolhida e as condições do produto segundo o modelo de Pirraglia et al (2010).

Pirraglia et al. (2010) projetaram a produção de pellets de madeira com umidade de 7+/- 1%, iniciando com a alimentação de biomassa florestal do gênero Pinus com 55% de umidade, reduzida a 6+/-1% durante a secagem, crescendo levemente a 10+/-1% no umidificador e por fim chegando a umidade final após a peletizadora. Segundo Eufráde Jr (2021), as madeiras de eucalipto recém-abatidas possuem umidade entre 50% e 60%. Logo, assumir um modelo que utiliza matéria prima a 55% de umidade é coerente com o valor médio dessa propriedade no projeto deste trabalho.

Em relação à quantidade de biomassa necessária para produzir uma tonelada de pellets de madeira, é preciso realizar o balanço de massa ao longo das etapas, considerando a conservação da massa seca e as respectivas eficiências. Essas foram premissas utilizadas pelos autores, ao assumirem 100% de eficiência em todas as etapas, exceto para etapa de peletização considerada de 90%, mas que apesar disso, o trabalho informa que os 10% não são perdidos e sim recirculados para o processo. Logo, 100% da biomassa que entra no modelo é transformada em pellet.

Dessa forma, a Tabela 11 a seguir realiza as conversões de forma retroativa, a partir dos dados citados no segundo parágrafo desta seção. Partindo da produção de 75.000t de pellets de madeira, foi calculada a massa seca final, que é constante em todo o processo. Utilizando os valores centrais de umidade informados de cada etapa, foi calculada a massa total de cada corrente a partir da adição da porcentagem de água, segundo a Eq. (12) abaixo.

$$Massa\ total = \frac{Massa\ seca}{1 - \% umidade} \quad (12)$$

Onde,

- Massa total e Massa seca expressas em tonelada
- %umidade expressa em número fracionado

Concluiu-se então que são necessárias 155.000t de biomassa florestal para a produzir 75.000t de pellets de madeira, como é mostrado na Tabela 11. A partir desses dados, pode-se perceber que, assim como Qian e Mc Dow (2013) encontraram a proporção de dois para um entre matéria prima e produto na produção de pellets de madeira nos EUA, nas condições analisadas neste trabalho, essa razão também é próxima a dois.

Tabela 11: Cálculos de massa (t) por corrente do processo

	Etapa			
	Alimentação	Secador	Umidificador	Pelletizadora
Eficiência	100%	100%	100%	90%, mas outros 10% são recirculados
Umidade da corrente* (%)	55%	6 ±1%	10 ±1%	7±1%
Massa total* (t)	155.000,00	74.202,13	77.500,00	75.000,00
Massa seca* (t)	69.750,00	69.750,00	69.750,00	69.750,00

* Referentes as correntes que deixam a etapa

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do modelo de Pirraglia et al (2010)

Tendo em posse esses valores, a Teoria de Weber foi aplicada. O IM encontrado foi de aproximadamente 2,07 e o PL de 3,07. Sendo esse valor com maior peso para o processamento da matéria prima, a escolha da planta foi realizada de acordo com a disponibilidade de árvores do gênero Eucalipto. Segundo o relatório de Silvicultura (2020), o estado de Minas Gerais apresentou maior comercialização de madeira a partir de florestas plantadas, seguido pelo estado do Paraná. Levando em consideração também o mercado consumidor, o trabalho utilizou o mapeamento realizado por Liévano (2020), sobre a distribuição de usinas termelétricas a carvão por região, já que são potenciais destinos para a substituição com pellets de madeira. Nesse mapa, a região Nordeste foi indicada com a maior concentração dessas usinas, seguido pela região Sul. Logo, unindo as duas informações de disponibilidade de matéria prima e de mercado consumidor, o estado do Paraná foi escolhido para o projeto.

4.2 Cenário base do projeto

O cenário para a análise viabilidade econômica foi definido pelas seguintes características:

- Capacidade da planta: 75.000t/ano, sendo metade desse valor a produção no ano 1 e ano 11 de operação, devido a convenção de *half-year* adotada e descrita na seção 3.3.2;
- Taxa de ocupação: 40% no ano 1 de operação, 70% no ano seguinte e a partir do 3º ano operacional, 100% da capacidade;
- Período para construção e realização do IF: 3 anos;
- Período de avaliação do projeto: Tempo de construção mais 11 anos corridos, correspondentes a 10 anos de operação;

- Horas totais de operação da planta: 8.400h/ano;
- Localização: Paraná, Brasil;
- Preço de venda: Preço FOB sem impostos. Impostos estaduais e federais sendo repassados separadamente ao consumidor, não entrando na análise de viabilidade do projeto;
- Volume de vendas igual ao volume de produção, ou seja, sem formação de estoques;
- Capital para investimentos: próprio.

Esse cenário para cada ano está descrito no Apêndice A.

4.3 Investimento total

A partir dos dados fornecidos pelo modelo de Pirraglia et al (2010) sobre o custo de aquisição de equipamentos e itens necessários para a construção de uma planta para produção de pellets de madeira nos EUA, em 2009, comercializados em sacos, com capacidade de 75.000t/ano, detalhados no Apêndice B, calculou-se o investimento estimado das unidades industriais (UI) deste projeto.

A adaptação de tempo utilizou o CWCCIS nacional em 2009 de 1,009608 e em 2020 de 1,009020 (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2021). Na prática isso representa uma redução do investimento necessário para construir uma planta em 2020 em relação a 2009. Isso pode ser justificado pela crise americana de 2007-2009 que eclodiu na pior recessão do país desde 1948, desestimulando novos projetos no período, frente a um cenário econômico melhor em 2020, ainda que prejudicado pela pandemia do COVID-19 (UOL, 2021).

Para a conversão da moeda utilizou-se o valor médio do câmbio de compra anual em 2021, ano completo mais recente, de R\$5,3949 (BACEN, 2022), como detalhado no Apêndice C. Esse valor representa a valorização da moeda americana comparada à brasileira. Essa relação depende de diversos cenários micro e macroeconômicos que não são objetivo deste trabalho detalhar.

A utilização do fator de localidade considerou o índice de 1,14 desenvolvido por Towler e Sinnot (2008). Ele indica que é mais custoso investir em um projeto no Brasil do que nos EUA. Esse resultado encontra-se principalmente ligado ao grau de desenvolvimento tecnológico nacional, com índices que movem parte da economia norte-

americana e acabam reduzindo o valor dos equipamentos associados às tecnologias, além do estímulo das políticas públicas sobre o setor de inovação (ITI, 2020).

Os custos de contingência, de engenharia e de tecnologia foram calculados a partir do UI e o somatório dos quatro itens resultou no investimento fixo (IF) necessário ao projeto. O capital de giro (CG) foi calculado em seguida, a partir do IF e o investimento total foi obtido. O passo a passo detalhado dessas etapas encontra-se no Apêndice D e o resumo das parcelas principais na Tabela 12 a seguir. O. Dessa forma, o investimento total estimado para a construção da planta foi de R\$ 101,3 milhões.

Tabela 12: Estimativas de investimento

Parcela	Brasil , 2020 (R\$)
Investimento fixo	R\$ 88.090.117,90
Capital de giro	R\$ 13.213.517,68
Investimento total	R\$ 101.303.635,58

Fonte: Elaboração própria a partir de dados adaptados do modelo de Pirraglia et al (2010)

Vale ressaltar que o presente trabalho tem como objetivo avaliar a pré-viabilidade de uma planta construída no futuro próximo. Logo, a atualização de valores no tempo leva em consideração os dados mais recentes disponíveis. No caso do fator de atualização no tempo de investimento fixo, o CWCCIS mais recente foi o de 2020. Já os dados de câmbio, de 2021. O fator de nacionalização, apesar de ter sido desenvolvido em 2008, ainda reflete a relação Brasil e EUA, sendo utilizado em análises de pré-viabilidade.

4.4 Custo de produção

A construção da parcela do custo variável, seguindo a metodologia descrita na seção 3.3.1, considerou estimativas para a madeira úmida e para a eletricidade. O valor para a compra da matéria prima entregue no Paraná foi de R\$ 114/t, seguindo a análise feita por Freitas (2021) que realizou uma média das consultas com 13 fornecedores localizados no Paraná, sul de São Paulo e norte Santa Catarina para o suprimento de toras úmidas de Eucalipto e Pinus. Já para a eletricidade no Paraná, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), divulgou que a maior parte das indústrias pagou R\$ 394,85/MWh segundo dados das tarifas de 2020 (ANEEL, 2020). Assim sendo, esse foi o valor

utilizado por este trabalho para cálculo do custo variável. Com isso, chegou-se ao resultado da Tabela 13 abaixo.

Tabela 13: Custo variável

Item	Preço unitário	Fonte	Quantidade anual necessária	Custo total anual (R\$/ano)	Custo unitário (R\$/t)
Madeira úmida	R\$ 114,00/t	MFL Rural (2020)	155.000t	R\$ 17.670.000,00	R\$ 235,60
Eletricidade	R\$ 0,39485/kWh	ANEEL (2020)	41.430.066,24 kW	R\$ 16.358.661,65	R\$ 218,12
TOTAL				R\$ 34.028.661,65	R\$ 453,72

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados das fontes descritas

Os custos fixos desembolsáveis foram calculados a partir da distribuição em parcelas dependentes do CTP e parcelas nominais, como segue na Tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Formação dos custos desembolsáveis

Item	Formação do custo	Parcela dependente do CTP	Parcela nominal	
Custos desembolsáveis diretos	Mão-de-obra de operação (MOP)	10% CTP	0,1 CTP	
	Supervisão e chefia	10% MOP	0,1*0,1CTP	
	Cargos de laboratório	10% MOP	0,1*0,1CTP	
	Manutenção	4% ISBL ou 4%(60%IF)	-	R\$ 1.705.087,92
	Overhead diretos gerais	45% MOP	0,45*0,1*CTP	-
Custos desembolsáveis indiretos	Impostos e seguros	1,5% IF	-	R\$ 1.278.815,94
	Overhead indiretos gerais	65% (MOP+Manutenção)	0,65*(0,1*CTP)	R\$ 1.108.307,15
TOTAL CF DESEMBOLSÁVEL		0,23*CTP	R\$ 4.092.211,01	

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Peter, Timerhaus e West (2003)

Para solucionar a Eq. (5), a Tabela 15 foi montada e o CTP foi obtido como R\$ 49,51 milhões/ano para 100% de taxa de ocupação da capacidade instalada da planta.

Tabela 15: Cálculo do CTP

Item do CTP	Parcela dependente do CTP	Parcela fixa
TOTAL Custo fixo desembolsável	0,23*CTP	R\$ 4.092.211,01
TOTAL Custo variável	-	R\$ 34.028.661,65
TOTAL CTP		R\$ 49.507.626,84

Fonte: Elaboração própria

Tendo o valor do CTP, foi possível calcular cada item do CF desembolsável, totalizando R\$ 15,48 milhões, como é indicado na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16: Custo fixo desembolsável

Item		Custo (R\$)	
Custos desembolsáveis diretos	Mão-de-obra de operação (MOP)	R\$	4.950.762,68
	Supervisão e chefia	R\$	495.076,27
	Cargos de laboratório	R\$	495.076,27
	Manutenção	R\$	1.705.087,92
	Overhead diretos gerais	R\$	2.227.843,21
Custos desembolsáveis indiretos	Impostos e seguros	R\$	1.278.815,94
	Overhead indiretos gerais	R\$	4.326.302,89
TOTAL CF DESEMBOLSÁVEL		R\$	15.478.965,19

Fonte: Elaboração própria

Vale ressaltar que o modelo de Pirraglia et al. (2010) estimou a necessidade de 30 cargos de operadores e chefia, considerando os três turnos de operação. Dessa forma, dividindo o somatório dessas parcelas, por 12 meses, por 30 cargos e considerando uma média de 40% dos gastos com funcionários direcionados a impostos (SOLIDES, 2022), resultou em uma média de R\$ 9.000 de salário entre esses funcionários. Esse valor estimado é alto, cerca de 7 vezes o salário mínimo brasileiro (AGÊNCIA SENADO, 2022). Logo, durante a implementação desta planta é provável que o custo fixo desembolsável seja reduzido. Uma postura conservadora vou assumida e o valor estimado mais alto foi mantido para os cálculos

O resultado do custo fixo não desembolsável, isto é, da depreciação dos equipamentos previstos no investimento fixo do projeto, foi calculado para cada ano e o resultado foi indicado na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17: Depreciação em cada ano do projeto

Ano	Operação em meses	Depreciação (R\$/ano)
1	0	R\$ -
2	0	R\$ -
3	0	R\$ -
4	6	R\$ 8.525.439,61
5	12	R\$ 15.345.791,30
6	12	R\$ 12.276.633,04
7	12	R\$ 9.821.306,43
8	12	R\$ 7.860.455,32
9	12	R\$ 6.283.248,99
10	12	R\$ 5.584.162,94
11	12	R\$ 5.584.162,94
12	12	R\$ 5.592.688,38
13	12	R\$ 5.584.162,94
14	6	R\$ 2.796.344,19

Fonte: Elaboração própria a partir da metodologia MACRS-10 (IRS, 2021)

4.5 Preço médio de venda do produto

O preço de venda médio dos pellets de madeira publicado no período entre 18 de agosto de 2021 e 20 de julho de 2022, segundo o índice da *Argus Media - US fob export price (industrial wood pellets) – Origin fob southeast US - Spot* foi de U\$ 220,28. Aplicando o fator de câmbio de venda descrito na seção 3.2.2.3, obtém-se o valor de R\$ 1.188,51/t.

4.6 Despesas operacionais

As despesas operacionais foram calculadas seguindo a metodologia da seção 3.5, obtendo o resultado descrito na Tabela 18 abaixo. A despesa anual foi calculada considerando 100% de taxa de ocupação da capacidade instalada resultando em R\$ 4,3 milhões/ano.

Tabela 18: Despesas operacionais

Item	Despesa unitária (R\$/t)		Despesa anual (R\$/ano)	
Despesas administrativas	R\$	13,20	R\$	990.152,54
Despesas comerciais	R\$	32,37	R\$	2.427.719,52
Despesas P&D	R\$	11,89	R\$	891.382,01
TOTAL DESPESA OPERACIONAL	R\$	57,46	R\$	4.309.254,07

Fonte: Elaboração própria a partir de Peter, Timmerhaus e West (2003), Pirraglia et al. (2010) e ANP (2020)

4.7 Ponto de nivelamento de caixa

O ponto de nivelamento de caixa para o cenário base foi de 21.066 t/ano ou ainda, metade disso, 10.533t para os anos em que a operação ocorre apenas em seis meses. Os fatores utilizados para resolução da Eq. (11) foram os da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo. Em todos os anos de operação, o volume de produção foi previsto com valores acima desse parâmetro. Logo, avaliando apenas os gastos desembolsáveis, o caixa se mantém positivo em todos os anos.

Tabela 19: Ponto de nivelamento de caixa

Item	Valor	
Custo variável unitário	R\$	453,72
Custo fixo	R\$	15.478.965,19
Preço de venda	R\$	1.188,51
Ponto de nivelamento (t/ano)		21.066

Fonte: Elaboração própria

Além disso, o valor de 21.066t/ano representa 28% do total de capacidade prevista de 75.000t/ano. Essa porcentagem é considerada baixa e favorável para a viabilização do projeto.

4.8 VPL, TIR e Payback descontado

Com o cenário do projeto definido, custo de produção e despesas calculadas, e preço de venda estimado, o DRE foi montado e o imposto de renda federal foi obtido. O Apêndice E possui o detalhamento desse índice. Adicionando os custos com investimento

total e aplicando a taxa mínima de atratividade de 13,09%, como indicado na seção 3.7, o fluxo de caixa descontado foi montado no Apêndice F. A partir desses dados, os índices foram calculados para o cenário base.

O VPL resultante foi de R\$ 2.217.680,94. Sendo esse valor positivo, do ponto de vista teórico, o investimento é economicamente viável, apresentando condições de remuneração aos investidores no cenário base com a TMA adotada neste estudo. Entretanto, esse valor está muito próximo do limite de viabilidade, indicando que pequenas variações no cenário podem gerar resultados econômicos não favoráveis.

A TIR encontrada foi de 13,54%. Sendo esse valor maior que a TMA, na teoria, o investimento no cenário base é economicamente viável. Apesar disso, a margem de segurança entre esse valor e a TMA de 13,09% é baixa e indicando, novamente, que variações brandas podem gerar resultados economicamente negativos.

O *Payback* descontado encontrado para o cenário base foi de 13,47 anos. O Apêndice G detalha o FCD acumulado e o intervalo em que foi realizada a interpolação para encontrar esse resultado. Ainda que o tempo de retorno do investimento esteja dentro dos 14 anos de avaliação do projeto, é um tempo relativamente alto para que o investidor passe a lucrar. Dessa forma, esse índice deve ser avaliado junto aos outros para que a tomada de decisão sobre realização do projeto seja realizada de forma mais assertiva.

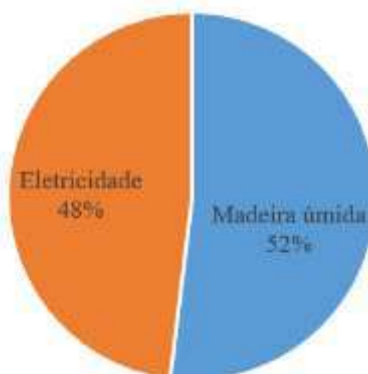
4.9 Análise de sensibilidade

A partir dos resultados do cenário base, o presente trabalho avaliou quais são os limites de viabilidade econômica quando determinados parâmetros sofrem variações. O estudo avaliou a sensibilidade em relação a três parâmetros: Custo variável unitário, Preço de venda e Investimento fixo. Os resultados serão apresentados pela TIR em cada um dos cenários, considerando a TMA de 13,09% adotada como premissa neste trabalho.

4.9.1 Sensibilidade: Custo variável unitário

Com os resultados descritos na 3.3.1 foi possível avaliar percentualmente a influência do custo de aquisição da madeira úmida e da eletricidade necessárias à produção. O resultado é apresentado na Figura 18 a seguir. A distribuição indica uma influência quase idêntica entre os dois insumos para a produção de pellets de madeira.

Figura 18: Distribuição percentual do custo variável unitário



Fonte: Elaboração própria

4.9.1.1 Sensibilidade: Custo de aquisição da madeira úmida

O presente trabalho adotou a premissa conservadora para o uso da madeira como matéria-prima. O custo de aquisição mapeado considerou a madeira descascada, em formato de tora úmida, entregue na planta estimada para o estado do Paraná e com modalidade de venda *spot*. Com a implementação do projeto, a aquisição desse insumo buscaria opções menos nobres e conseqüentemente, com menor custo. Assim como na indústria de celulose, o fornecimento da madeira de Eucalipto e Pinus é comumente realizado por contratos de longo prazo com pequenos produtores a partir de florestas plantadas localizadas próximas às indústrias de consumo. Vale destacar a atuação nesse mercado desses pequenos produtores no Brasil cresce exponencialmente, apresentando resultado de 600% de aumento entre 2009 e 2019 (AZEVEDO; LEITE, 2013; IMAFLORA, 2020). Nesse sentido, não apenas o custo de aquisição sofre redução, como também o frete para entrega do material. Além disso, este projeto também possui capacidade de ser implementado por indústrias que geram resíduos de materiais lignocelulósicos, representando um custo de oportunidade capaz de reduzir ainda mais o custo associado.

Como a madeira pode ser considerada uma *commodity*, uma previsão de alta de preço, caso ocorra escassez no mercado, também deve ser prevista (FOELKEL, 2013).

Nessa conjuntura, foram avaliadas variações de -100%, -50%, -30%, -20%, -10%, 10%, 20% e 30% sobre o preço base de R\$ 114,00/t para aquisição da madeira úmida.

Vale ressaltar que ao modificar uma parcela do custo variável unitário, todos os outros parâmetros em função dele, também serão alterados. O resultado foi obtido conforme a Figura 19.

Figura 19: Variações no custo de aquisição da madeira (%) x TRI (%)



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que, o cenário base com custo unitário da madeira de R\$ 114,00/t está próximo ao limite de viabilidade econômica. Esse limite é representado pelo cruzamento entre a curva dos valores da TIR com a do TMA, que ocorre em aproximadamente 3% de acréscimo no preço da madeira úmida. Os cenários com redução nesse custo resultam em taxas internas de retorno mais distantes da taxa mínima de retorno adotada, logo, apresentam uma maior margem de segurança diante das incertezas associadas ao projeto. Já os cenários onde o custo de aquisição da madeira é acrescido indicam ausência de viabilidade econômica.

Tendo em vista que há mais fatores mapeados que indicam maior probabilidade de o custo da madeira ser reduzido, a expectativa é de que em um cenário prático de implementação do projeto, o custo da madeira seja menor que R\$ 114,00/t.

4.9.1.2 Sensibilidade: Custo de aquisição da eletricidade

Como o cenário base deste projeto, adotou a compra de eletricidade diretamente da distribuidora de energia do Paraná, seguindo a orientação do modelo de Pirraglia et al. (2010), o estudo de sensibilidade deve prever variações no valor em R\$/kWh da energia distribuída pela Copel. Para tal, a escolha dos percentuais de variação baseou-se no ajuste ocorrido entre 2015 e 2021 de 16,3% no custo da energia elétrica residencial (CORSINI, 2022). Apesar deste projeto utilizar a eletricidade para uso industrial, com o objetivo de avaliar a sensibilidade, esse valor foi utilizado como base para estimar o limite absoluto de 20% de variação, que será aplicada na forma positiva e negativa. Dessa forma, as variações avaliadas foram de -20%, -10%, -5%, 5%, 10% e 20% sobre o preço base de aquisição da energia elétrica. Assim como foi realizado na seção anterior, a variação no custo unitário da eletricidade afeta outros parâmetros do projeto que devem ser ajustados para avaliação dos resultados. A Figura 20 apresenta os resultados de sensibilidade.

Figura 20: Variações no custo de aquisição da eletricidade (%) x TRI (%)



Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar pelo perfil do gráfico que o custo unitário da eletricidade de R\$ 0,39485/kWh no cenário base, assim como ocorreu durante a avaliação da sensibilidade do custo da madeira úmida, encontra-se próximo ao limite de viabilidade econômica. Esse limite é observado pelo ponto onde a curva dos valores da TRI se cruza com a do TMA, que ocorre em aproximadamente 4% de incremento no preço da eletricidade. Cenários

em que o custo de aquisição foi acrescido, resultaram em ausência de viabilidade econômica. Quando a variação foi redutora, os resultados econômicos proporcionados pelos novos custos foram mais atrativos do ponto de vista do investidor, adicionando maior segurança frente às incertezas que podem ocorrer na prática.

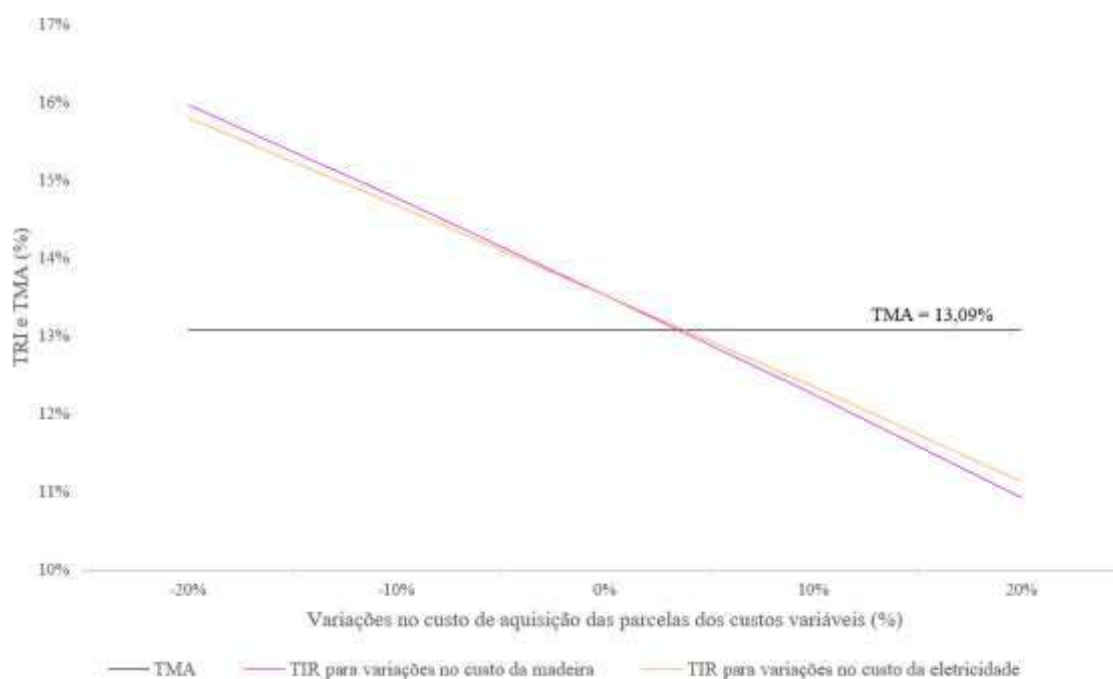
Diante do histórico do custo dessa utilidade no Brasil, esse índice deve receber atenção durante a implementação do projeto. Analisando individualmente a variação do custo de aquisição de eletricidade, mantendo todos os outros parâmetros constantes, o aumento desses custos no futuro, quando o projeto fosse implementado, possui elevadas chances de tornar o projeto inviável economicamente.

Além disso, a obtenção da eletricidade pode buscar outras alternativas como a reserva de parte da produção dos pellets de madeira para a geração de energia internamente, desenvolvimento de tecnologias de integração energética²⁰ com a etapa de resfriamento ou ainda pela geração de eletricidade a partir de painéis fotovoltaicos na indústria. Todas essas três opções demandam variações não apenas no custo de aquisição dessa utilidade, como também no investimento necessário para a implementação desses sistemas. Dessa forma, como o presente trabalho foi realizado partindo de dados da literatura, essas alternativas não foram desenvolvidas por demandarem estudos mais complexos. Entretanto o mapeamento delas é interessante para fases futuras de implementação da planta estimada neste trabalho, já que podem influenciar diretamente no resultado econômico.

Para comparar a sensibilidade entre as duas parcelas que compõem o custo variável, foram sobrepostos os resultados das variações compartilhadas entre as duas análises, -20%, -10%, 10% e 20%. A Figura 21 apresenta essa sobreposição.

²⁰ Técnica industrial com objetivo de reaproveitamento de energia térmica subutilizada, a partir do contato entre correntes quentes e frias (PROPEQ, 2020)

Figura 21: Variações nas parcelas dos custos variáveis (%) x TRI (%)



Fonte: Elaboração própria

O gráfico acima indica que a sensibilidade econômica do projeto é um pouco maior para variações no custo da madeira, já que para mesmos percentuais de variação, a TIR é mais afetada, seja por acréscimo quando a variação do custo é negativa, ou por redução quando a variação é positiva. Esse resultado já era esperado após a avaliação da influência de cada parcela no custo variável unitário total, apresentado na Figura 18, em que a madeira úmida possui maior porcentagem do todo, bem como nos limites de viabilidade econômica encontrados em cada um dos gráficos, com o percentual de acréscimo limitante da eletricidade maior que o da madeira. Dessa forma, os fatores que influenciam no custo de madeira úmida estarão sendo refletidos de modo mais expressivo na viabilidade econômica deste projeto.

4.9.2 Sensibilidade: Preço médio de venda do produto

A variação no preço de venda do produto é mais uma avaliação que deve ser prevista na análise de viabilidade econômica de um projeto, já que o mercado é dinâmico e variações nos preços são esperadas. Sendo o pellet de madeira uma *commodity*, variações positivas e negativas acompanham características micro e macroeconômicas. O preço médio de venda dos pellets de madeira estimado foi de R\$ 1.188,51/t, considerando

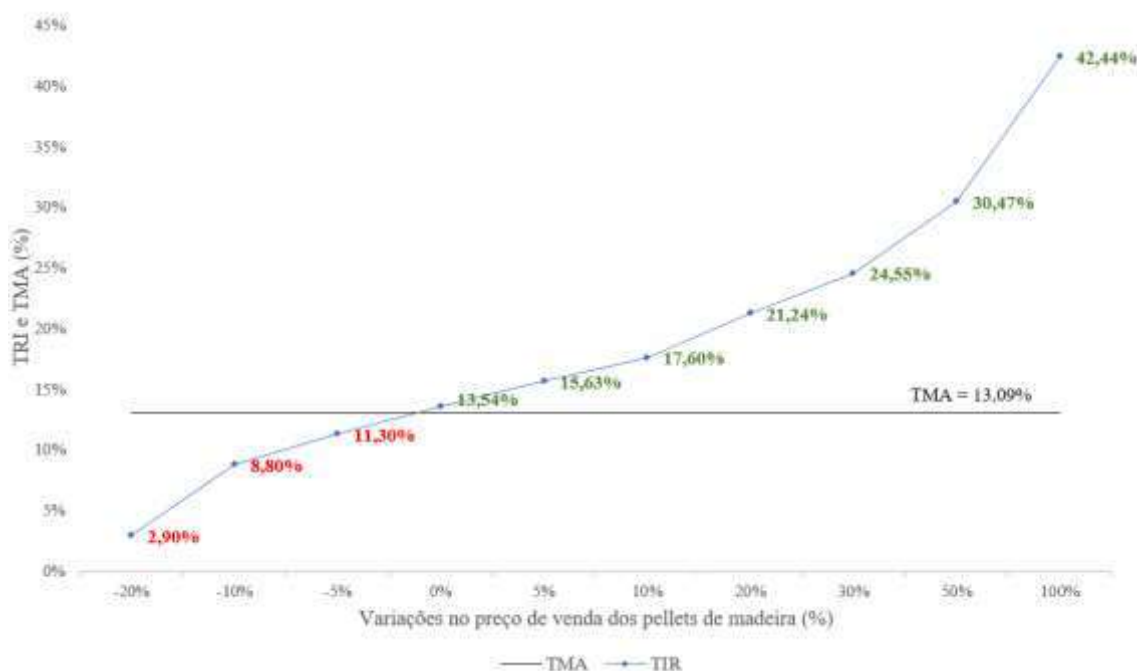
a média no período entre 18 de agosto de 2021 e 20 de julho de 2022 do preço *Argus - US fob export price (industrial wood pellets) – Origin fob southeast US - Spot*, convertida de dólares para reais com a taxa cambial descrita na seção 3.2.2.3.

Com o objetivo de auxiliar a escolha dos valores nominais para aplicação de cenários distintos, a avaliação da variação percentual entre o maior preço de venda e o menor preço de venda no período analisado, segundo o referido índice, foi realizada. Um incremento de 116% foi observado. Esse percentual elevado pode ser justificado por duas razões principais.

Inicialmente, como já foi largamente discutido durante a revisão bibliográfica no capítulo 2, a demanda por combustíveis alternativos capazes de reduzir a emissão de GEE global aumenta a cada ano, com 350% de crescimento do uso de biomassa sólida entre 2000 e 2019 (GLOBAL BIOENERGY STATISTICS, 2021). O aumento da demanda, leva naturalmente a elevação dos preços. Além disso, o conflito geopolítico entre Rússia e Ucrânia, iniciado pela invasão russa ao país do leste europeu em março de 2022, gerou uma crise energética mundial. Isso porque a Rússia é um importante fornecedor de petróleo e gás natural e desde o início da guerra, as exportações foram reduzidas pelos embargos econômicos realizados por diversos países (G1,2022). Nesse contexto, um aumento geral sobre os outros combustíveis vem sendo observado, sendo um dos motivos para elevados preços de comercialização de pellets de madeira.

Tendo em vista o cenário global, as variações positivas de 100%, 50%, 30%, 20%, 10% e 5% foram escolhidas para avaliação da sensibilidade. Já para as variações negativas, considerando o resultado do cenário base próximo ao limite de viabilidade, com TIR próxima a TMA, foram testadas as porcentagens de -5%, -10% e -20%, que resultaram em valores de TIR bastante baixos. O compilado dessas análises é apresentado na Figura 22.

Figura 22: Variações no preço de venda dos pellets de madeira (%) x TRI (%)



Fonte: Elaboração própria

É possível constatar pelo gráfico que o preço médio de venda de R\$ 1.188,51/t adotado no cenário base, está próximo ao limite de viabilidade econômica. Pode-se concluir que a variação de -1% inviabiliza o projeto do ponto de vista econômico, pelo cruzamento entre a curva dos valores da TIR com a TMA. Esse é considerado um limite bastante estreito que deve ser ponderado na implementação do projeto como um dos principais fatores.

Apesar dos resultados de variações negativas não serem promissores, o lado oposto da curva, quando acréscimos sobre o preço de venda são aplicados indica boa perspectiva para o projeto. Com valores de TIR crescendo percentualmente mais do que o percentual de aumento do preço, os resultados apresentam elevada atratividade caso preços mais altos se concretizem no mercado, seguindo a tendência histórica.

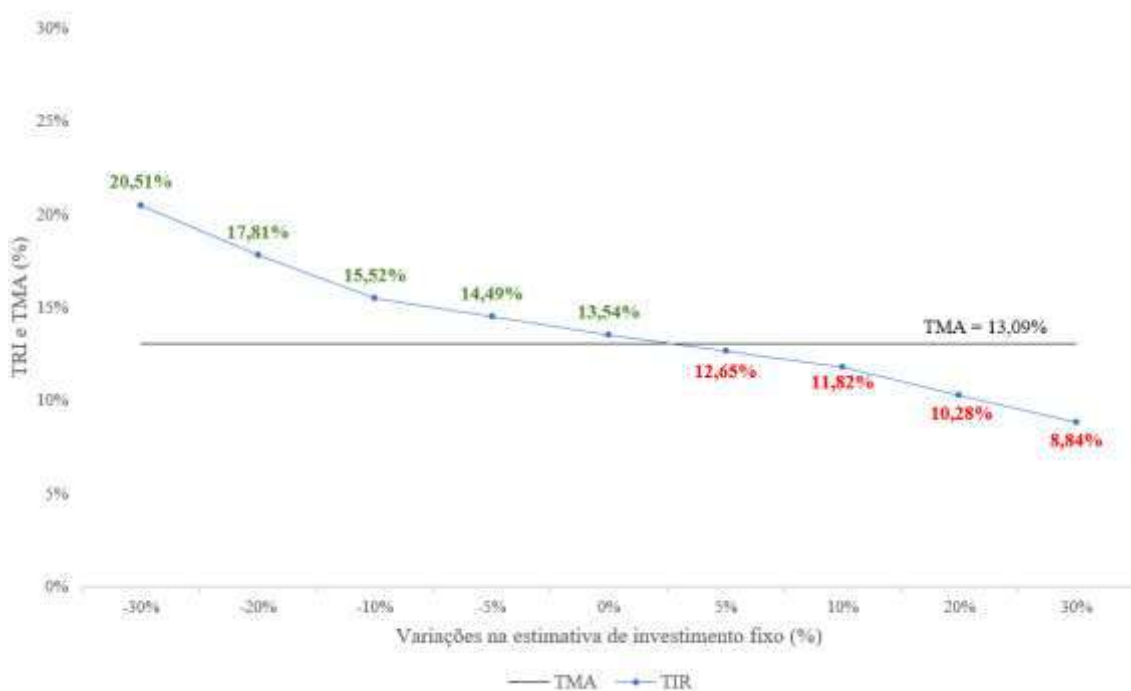
4.9.3 Sensibilidade: Investimento fixo

O resultado de ponto de nivelamento representando apenas 28% do total de capacidade da planta comparado a TIR no cenário base próxima a TMA adotada, indica que o valor do investimento fixo estimado está sendo um fator de grande relevância para o resultado econômico do projeto. Nesse sentido, a avaliação da sensibilidade desse

parâmetro é importante para a tomada de decisão de implementação da planta pelo investidor.

Durante a realização das estimativas para o investimento fixo a partir de capital próprio, algumas incertezas encontram-se relacionadas aos fatores de atualização que foram aplicados para obtenção dos valores. Sendo o CWCCIS publicado pelo exército americano, taxa cambial divulgada pelo BACEN e o fator de nacionalização de Towler e Sinnott (2008), médias empíricas de diversos projetos, na prática, ao custo de determinados equipamentos pode variar. Dessa forma, para avaliar a sensibilidade das estimativas de investimento fixo foram realizadas variações de -30%, -20%, -10%, -5%, 5%, 10%, 20% e 30%. A Figura 23: Variações na estimativa de investimento fixo (%) x TRI (%) Figura 23 abaixo apresenta esses resultados.

Figura 23: Variações na estimativa de investimento fixo (%) x TRI (%)



Fonte: Elaboração própria

Novamente o gráfico indica que o investimento fixo estimado de R\$ 88,09 milhões está próximo ao limite de viabilidade econômica. Esse limite é de aproximadamente 3% de incremento, obtido pelo cruzamento das curvas TMA e TIR, com capacidade de inviabilizar o projeto do ponto de vista econômico, ao manter constantes todos os outros parâmetros do cenário base. Isso significa que valores praticados com redução do investimento fixo estimado no cenário base, ou ainda com até 3% de acréscimo, promoveriam um projeto com viabilidade econômica.

Nesse sentido, estando sob uma faixa limitada de viabilidade caso algum equívoco se confirme, para a implementação do projeto é recomendada a atualização dos dados de investimento diretamente com fornecedores de equipamentos, reduzindo as incertezas geradas pelos fatores de atualização que foram utilizados neste trabalho como métodos de simplificação.

5 Conclusões

Diante da contextualização desenvolvida na seção 2, foi possível perceber o apelo mundial para a produção e utilização de alternativas energéticas capazes de reduzir a emissões de GEE e conseqüentemente, amenizar os impactos ambientais causados pela poluição gerada, principalmente, por combustíveis fósseis (IPCC, 2021). O Brasil se posiciona nesse cenário com características edafoclimáticas que propiciam elevado potencial de desenvolvimento energético por meio de fontes limpas e que se refletem na matriz elétrica atual do país com 84,8% formados por fontes alternativas (BEN, 2021). Apesar desse resultado, a dependência à energia advinda de hidrelétricas é grande e tem colocado em risco o fornecimento de energia limpa durante os últimos anos com longos períodos de chuva abaixo da média (ONS, 2021). Dessa forma, a produção de um novo biocombustível é interessante.

Nesse contexto, o pellet de madeira surge como alternativa adensada com maior densidade energética, com valores próximos aos dos combustíveis fósseis tradicionais, baixo teor de umidade, alto teor de voláteis, com facilidade de manuseio e armazenamento, além de geometria regular favorável a automatização de sistemas de alimentação (GARCIA et al., 2013). Sua produção é realizada por um processo essencialmente mecânico e com poucas etapas, constituído de fluxograma simplificado

O mercado de pellets de madeira está em fase de desenvolvimento acelerado. A atuação do Brasil nesse mercado ainda é incipiente, mas bastante promissora. Vantagens proporcionadas por uma alta produtividade florestal e baixa rotação dos ciclos de árvores do gênero Eucalipto e Pinus, quando comparada a outros países, são fatores positivos para o desenvolvimento de plantas de pellets de madeira no Brasil.

A partir da metodologia adotada, adaptando o modelo de Pirraglia et al. (2010), foram obtidas estimativas de investimento total de R\$ 101,3 milhões e custos de produção de R\$ 49,51 milhões/ano. O preço médio de venda do produto adotado foi de R\$ 1.188,51/t. O ponto de nivelamento de caixa encontrado para essas condições foi de 21.066 t/ano. Esse valor representa 28% do total da capacidade da planta, um patamar baixo que indica alta probabilidade de uma planta a partir deste projeto obter lucro operacional, isto é, custear os gastos operacionais por meio da receita de venda.

Com o desenho do projeto no cenário base foi possível calcular métricas de viabilidade econômica. Adotando a TMA de 13,09%, o resultado do VPL foi de R\$ 2.217.680,94, a TIR de 13,54% e o *payback* descontado de 13,47 anos a partir do início da construção da planta. Todos os três resultados enquadram o projeto em viável do ponto de vista econômico teórico, entretanto, também foi possível verificar que esses resultados se encontram próximos aos limites de viabilidade. Isso indica a presença de gargalos que foram avaliados durante as análises de sensibilidade.

A variação no custo de aquisição da madeira úmida ressaltou a importância do desenvolvimento de estratégias de fornecimento dessa matéria-prima. A escolha conservadora de obtenção nobre desse material condiz com o resultado encontrado, por representar quase o preço máximo que o projeto suporta com viabilidade econômica. Dessa forma, é recomendado durante a implementação do projeto o desenvolvimento de contratos de fornecimento com pequenos produtores para aumentar o retorno ao investidor da planta de pellets de madeira.

A forma extrema para redução do custo de aquisição de madeira é a implementação deste projeto dentro de uma planta que já produz resíduos da indústria madeireira. Essa possibilidade é interessante ao gerar receita a partir de um material que seria descartado como resíduo ou vendido a baixos preços. Uma questão que deve ser ponderada nesse caso é a limitação da quantidade produzida do pellet de madeira pela geração dos resíduos, sendo uma planta com alimentação dependente de outra. Dessa forma, a escalabilidade nesse tipo de implementação é mais restrita. Além desses pontos, ao instalar uma planta de produção de pellets dentro de outra planta já existente poderia reduzir investimento fixo nas instalações administrativas que seriam compartilhadas entre ambas as plantas.

O resultado de sensibilidade no custo de aquisição da eletricidade também sugeriu a busca por fontes alternativas com possibilidade de redução de custo. Sendo este projeto desenvolvido para a produção de um biocombustível direcionado ao uso industrial para a geração de eletricidade em termelétricas, há a possibilidade de reserva de parte da quantidade de pellets de madeira fabricados para geração de energia internamente. Para que isso seja realizado, é preciso um estudo sobre os equipamentos necessários e investimentos associados, além do balanço final entre perda da receita de venda dessa quantidade consumida internamente e ausência de gasto com aquisição de eletricidade.

Além disso, considerando a etapa de resfriamento durante o fluxograma de produção, estratégias de integração energética também podem ser aplicadas. Nesse caso, também é necessário um estudo acerca da implementação desse sistema de reaproveitamento da energia térmica. Dessa forma, o consumo de eletricidade seria reduzido, mas uma nova parcela de investimento seria incluída no projeto, formulando um novo cenário que deve ser avaliado em relação à ótica econômica.

Por fim, do ponto de vista ambiental, também seria interessante mapear a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, como a utilização de painéis fotovoltaicos. De acordo com um estudo realizado pela Solarvolt (2022) a partir de dados da ANEEL, a instalação desses painéis pode reduzir até 95% o consumo de eletricidade de fontes externas. Além da possibilidade de geração de créditos de energia por meio do sistema de compensação desenvolvido pela ANEEL, quando ocorre a formação de estoques de energia remanescente pela indústria. Para avaliação da viabilidade dessa implementação, faz-se necessário realizar o balanço dos gastos da instalação e manutenção comparado ao gasto com consumo de eletricidade advinda de fontes externas.

Tendo em vista a produção dos pellets de madeira do projeto desenvolvido neste trabalho com foco para o uso industrial, em substituição a combustíveis sólidos de origens fósseis no mercado interno, a precificação capaz de gerar competitividade no mercado deve levar em consideração o custo do combustível tradicional. Visando o abastecimento das termelétricas da região sul brasileira, o mapeamento do preço de venda pago pelo combustível atual é importante para aumentar a efetividade da substituição. Dados divulgados no mercado em 2022 indicam uma faixa entre U\$ 100 e U\$ 700/t no preço do carvão mineral, de acordo com a qualidade energética, utilizados nas indústrias no Brasil (BIANCHETTI, 2022). Dessa forma, pode-se perceber a necessidade de novas etapas de viabilidade do projeto que sejam capazes de descrever com mais detalhes os consumidores alvo da produção desse biocombustível, para que um resultado assertivo seja obtido.

A análise de sensibilidade da TIR em relação às variações no investimento fixo indicou novamente a proximidade do cenário com o cenário limitante. Uma consulta diretamente com os fornecedores de equipamentos é fortemente indicada para a implementação deste projeto, com o objetivo de obter maior assertividade nos preços desses bens. Além disso, a avaliação de financiamento por terceiros, principalmente por

entidades que estimulam o desenvolvimento de novos projetos pode ser outra alternativa de viabilidade distinta da considerada no cenário base deste projeto.

Além disso, o cenário base considerou uma TMA sem risco adicionado a taxa de títulos Selic, o que na prática, possui um risco intrínseco.

A partir de todas as particularidades demonstradas neste trabalho, pode-se concluir que, no cenário base, a análise de pré-viabilidade do projeto de uma planta produtora de pellets de madeira no Brasil indica uma viabilidade crítica do ponto de vista econômico. Dessa forma, a implementação da planta com foco para comercialização do biocombustível no mercado interno ainda é um desafio que, apesar de apontar uma direção interessante de diversificação da matriz energética em renováveis, pode não ser capaz de gerar resultados econômicos positivos.

Referências bibliográficas

ABEEÓLICA. **Benefícios da energia eólica**. 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

ABIB. **Atlas brasileiro biomassa bioenergia 2020**. Curitiba, PR, 191 f., 2020

ABIB. **Industrial woodpellets brasil - Desenvolvimento da maior planta industrial no brasil**. 2014. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/12947/ABIB%20BRASIL%20BIOMASSA%20E%20ENERGIA%20RENOV%C3%81VEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ADAPEC. **Silvicultura**. 2022. Disponível em: <https://www.to.gov.br/adapec/silvicultura/2hbmy5knf9v6#:~:text=A%20Silvicultura%20%C3%A9%20o%20cultivo,o%20uso%20racional%20das%20florestas>. Acesso em: 02 ago. 2022.

AGÊNCIA BRASÍLIA. **Cenário econômico no Brasil e no Mundo pós COVID-19**. 2021. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2021/06/23/cenario-economico-no-brasil-e-no-mundo-pos-covid-19/>. Acesso em: 02 mai. 2022.

AGÊNCIA SENADO. **Salário mínimo de R\$ 1.212 é promulgado**. 2022. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/06/02/salario-minimo-de-r-1-212-e-promulgado>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ALAKANGAS, Eija. **New European Pellet Standard. EN 14961-1**. EUBIONET. Mai. 2010. Available from: http://www.infobio.ru/sites/default/files/Alakangas_Pellet_standard_EN14961-1.pdf Acesso em: 03 jun. 2022.

ALMEIDA, H. A. de. **Capítulo 1: A Atmosfera Terrestre**. Climatol. Apl. a Geogr. Campina Grande: EDUPB, 2016. p. 19–60.

ANDRADE, Alan Sulato de. **Máquinas térmicas. At-101**. Universidade Federal do Paraná. Curso de Engenharia Industrial Madeireira, 2011. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-AULA-08.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2022.

ANEEL (Brasil). **Atlas de energia elétrica**. 3. ed. Brasília, DF, 2008. Disponível em: https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3a-ed.pdf. Acesso em: 16 mai. 2022.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: ANEEL, 2ª Ed. 2005. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/handle/1/582>. Acesso em: 26 mai. 2022.

ANEEL. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 2.704, DE 23 DE JUNHO DE 2020**. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/wp-content/uploads/2020/07/reh20202704ti.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2022.

ANEEL. **Termelétricas têm participação importante no cenário energético brasileiro.** 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/termeletricas-cenario-energetico-brasileiro/>. Acesso em: 03 jul. 2022.

ANP. **Investimentos em PD&I.** 2020. Revisado em 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao/investimentos-em-pd-i> . Acesso em: 30 jul. 2022.

ARGUS MEDIA®. **About us.** 2022. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/pt/about-us>. Acesso em: 15 jul. 2022.

ASSAF NETO, Alexandre. **Mercado Financeiro.** 9ª Edição. São Paulo: Atlas, 2011.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente.** 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 965 f. 2006.

AWS. **O que é o armazenamento em nuvem?** 2022. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is-cloud-storage/>. Acesso em: 02 ago. 2022.

AZEVEDO, Tasso Rezende de; LEITE, Nelson Barboza. **Madeira para celulose: perspectivas brasileiras.** 2013. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/3-madeira-para-celulose-perspectivas-brasileiras/>. Acesso em: 06 ago. 2022.

BACEN. **Cotações e boletins.** 2022. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>. Acesso em: 29 jul. 2022.

BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. **Understanding Regulation: Theory, Strategy, and Practice.** Oxford: Oxford University Press, 2ª edição, 2012.

BARROS, Talita Delgrossi. **Silvicultura.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fmcbqchw02wyiv80kxlb36vbkge01.html> . Acesso em: 07 mai. 2022.

BIOENERGY EUROPE PELLETS REPORT 2021. Elaborado por Bioenergy Europe e Europe Pellet Council. 2021.

BIOMASSA BR. **O que é Biomassa.** 2022a. Disponível em: <http://www.biomassabr.com/bio/biomassabr.asp> . Acesso em: 05 mai. 2022.

BIOMASSA BR. **Biopellets bagaço e palha cana-de-açúcar.** 2022b. Disponível em: <https://www.brasilbiomassa.com.br/biopellets>. Acesso em: 15 ago. 2022.

BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Apostila de Curso. 1º sem/2003. Disponível em: <https://azdoc.tips/documents/geraoo-distribuiiao-e-utilizaaoo-de-vapor-5c144799c1f11>. Acesso em: 10 mai. 2022.

BOCK, Maiquel. **Geração Hidrelétrica: Conheça a história da geração de energia no Brasil.** Hidroenergia. 2018. Disponível em:

<https://www.hidroenergia.com.br/blog/historia-da-geracao-hidreletrica-brasil/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

BRANCO, Pécio de Moraes. **Carvão Mineral**. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html#:~:text=O%20poder%20calor%C3%ADfco%2C%20propriedade%20fundamental,8.650%20kcal%20nos%20demais%20carv%C3%B5es>. Acesso em: 20 abr. 2022.

BRANCO, Pécio de Moraes. **O que são e como se formam os fósseis?** Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/O-que-sao-e-como-se-formam-os-fosseis%3F-1048.html>. Acesso em: 20 abr. 2022.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia**. n.2. 25p. 1981.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus**. Ipef, Circular Técnica, Piracicaba, v. 146, p. 1-12, 1982.

BUHLERGROUP. **Precision pelleting dies and roller shells**. 2022. Disponível em: <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/services/Spare-and-Wear-Parts/Precision-pelleting-dies-and-roller-shells.html>. Acesso em: 08 jun. 2022.

CAIRES, Nilmara. **Eucalipto: por que se tornou a Árvore mais plantada no Brasil?** AgroPós. 2022. Disponível em: <https://agropos.com.br/eucalipto-no-brasil/>. Acesso em: 26 mai. 2022.

CAMONA, Bruna de Souza; KASSAI, José Roberto. **A matriz energética brasileira: uma análise perante a NDC e o ODS7**. XIX USP 2019, São Paulo. USP.

CAMPAGNER, M. R.; PITOMBO, L. M.; PAIVA, J. M. F. **Filmes poliméricos baseados em amido e lignossulfonatos: preparação, propriedades e avaliação da biodegradação**. Polímeros, v. 24, n. 6, p. 740-751, 2014

CAMPOS DE ANDRADE, A. L. **Energia e mudanças climáticas: uma discussão da matriz energética brasileira e do setor de transportes**. Florianópolis, UFSC- Programa de Pós-Graduação em Economia (Dissertação de Mestrado), 2010, 164 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94179>. Acesso em: 25 abr. 2022.

CAPITAL NOW. **Cálculo de depreciação: como fazer e qual sua importância**. 2019b. Disponível em: <https://capitalresearch.com.br/blog/calculo-de-depreciacao/#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20da%20soma%20dos,vida%20%C3%BAtil%20de%20um%20bem>. Acesso em: 30 jul. 2022.

CAPITAL NOW. **Taxa mínima de atratividade: o que é e como calcular nos investimentos**. 2019a. Disponível em: <https://capitalresearch.com.br/blog/taxa-minima-de-atratividade-o-que-e-e-como-calcular-nos-investimentos/>. Acesso em: 02 ago. 2022.

CAPITAL NOW. **Valor presente líquido (VPL): o que é, como calcular e principais vantagens**. 2020. Disponível em: <https://capitalresearch.com.br/blog/valor-presente-liquido-vpl/>. Acesso em: 25 jul. 2022.

CEPEA. **PIB DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO**. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 16 mai. 2022.

CESAM – UNIVERSIDADE DE AVEIRO. **Metais pesados detectados em "pellets" de aquecimento**. Entrevista concedida a JN Direto. 2015. Disponível em: <https://www.jn.pt/nacional/saude/metais-pesados-detetados-em-pellets-de-aquecimento-4565775.html>. Acesso em: 28 mai. 2022.

CETAX. **Big Data: O que é, conceito e definição**. 2022. Disponível em: <https://cetax.com.br/big-data/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

CHIAVENRO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração: uma visão abrangente da moderna administração das organizações**., Rio de Janeiro: Elsevier, 7 ed., 650 f., 2003. Disponível em: <https://redeprocurso.com.br/docs/T%C3%89CNICO%20EM%20ADMINISTRA%C3%87%C3%83O/M%C3%B3dulo/teoria-geral-da-administracao-chiavenato.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2022.

CIPOLLA, Carlo M. **História Econômica da População Mundial**. Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 1977.

CNN BRASIL. **Veja quando começa a vacinação contra a Covid-19 em cada estado**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/veja-quando-comeca-a-vacinacao-contr-a-covid-19-em-cada-estado/>. Acesso em: 02 mai. 2022.

COELHO, Jorge Cals et al. **Biomassa, biocombustíveis, bioenergia**. In: Biomassa, biocombustíveis, bioenergia. Ministerio das Minas e Energia, 1982.

CORSINI, Iuri. **Energia elétrica aumentou mais do que o dobro da inflação nos últimos anos**. 2022. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/energia-eletrica-aumentou-mais-do-que-o-dobro-da-inflacao-nos-ultimos-anos/>. Acesso em: 06 ago. 2022.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 732 p, 2008.

CORTEZ, Luis Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GOMEZ, Edgardo Olivares, **Biomassa para Energia**. 1 ed. Campinas, Editora da Unicamp, 2008.

COUTO, L. C.; ABRAHÃO, C. P.; FARIA E. R.; COUTO, L. M. F.. **Utilizações Energéticas da Biomassa Vegetal**. Revista Biomassa & Energia, Viçosa, Minas Gerais, v. 5, n. 1, 2012.

DIAS, J.J.M. **Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas**. Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 112p. Lisboa, 2002.

DIAS, Ricardo. **Desafio da nossa revolução industrial: indústria 4.0**. Indústria 4.0. Cubi Energia. 2018. Disponível em: <https://www.cubienergia.com/desafio-da-nossa-revolucao-industrial/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

DOLZAN, P.; BLANCHARD, M.P.; GRASSI, A; HEINIMO, J.; JUNGINGER, M.; RANTA, T. IEA Bioenergy. **Global Wood pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential**. Organizado pela IEA – International Energy Agency – Task 40. Paris, 112p., 2006.

ECYCLE. **Bioenergia: o que é, benefícios e desvantagens**. 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/bioenergia/>. Acesso em: 23 mai. 2022.

EMBRAPA. Briquetagem e Peletização de resíduos agrícolas e florestais. 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/932713/1/FOLDERBriquetagem22012.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2022.

EMBRAPA. **Os grandes ciclos Bioquímicos do Planeta**. 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/569371/1/doc119.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

EMBRAPA. **Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração?** 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/32985/1/CITE-04.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

ENGINEERS, Us Army Corps Of. **CWCCIS Indices**. 2021. Disponível em: <https://www.usace.army.mil/Cost-Engineering/cwccis/>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ENPLUS®. **Sobre o ENplus**. 2022. Disponível em: <https://enplus-pellets.eu/pt/sobre-enplus-pt-pt/historia.html>. Acesso em: 03 jun. 2022.

EPC. **Handbook for Certification of Wood Pellets for Heating Purposes**. v. 2.0, 46p, abr. 2013.

EPC. **ENplus**. 2022. Disponível em: <https://epc.bioenergyeurope.org/enplus/#:~:text=Class%20A1%20is%20the%20premium,installations%20and%20produces%20more%20ash>. Acesso em: 03 jun. 2022.

EPC. **Pellet Quality & Standards**. 2022. Disponível em: <https://epc.bioenergyeurope.org/about-pellets/pellets-basics/pellet-standards/>. Acesso em: 10 mai. 2022.

EPE, **Inventário Energético de Resíduos Rurais (2014)**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF, 51 f., out. 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-308/DEA%2015%20-%2014%20-%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20Rurais%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2022.

EPE. **O que são combustíveis?** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis>. Acesso em: 20 abr. 2022.

EQUIPE TOTVS. **O que é Inteligência artificial: saiba como funciona e aplicações**. 2019. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/inovacoes/o-que-e-inteligencia-artificial/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

ESFERA BLOG. **Energia de carvão mineral: entenda o que é e como ela é utilizada no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://esferaenergia.com.br/blog/energia-carvao-mineral/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

ESKILSSON, D.; RONNBACK, M.; SAMUELSSON, J.; TULLIN, C. **Optimisation of efficiency and emission in pellet burners, Proceedings of The First World Conference on pellets**. Biomass and Bioenergy, Estocolmo, v.27, n.6, p.541-546, dez.. 2004.

Eufrade-Junior, H. J., Rodrigues, S. A., Spadim, E. R., Guerra, S. P. S., Ballarin, A. W. **Predição do teor de umidade de toras longas de madeira de Eucalyptus urophylla estocadas em pilhas ao ar livre**. 2021. Scientia Forestalis, 49(130), e3461. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.03>. Acesso em: 30 jun. 2022.

EUROPEAN PELLET COUNCIL. **Handbook for Certification of Wood Pellets for Heating Purposes**. Version 2.0. [s. l.: s. n.], 2013. 46 p.

FAUSTO, Boris. **História do Brasil**. Boris Fausto. Documentário. TV Escola. 2002.

FEDERAL, Receita. **IRPJ (Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas)**. 2015a. Revisado em 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/IRPJ>. Acesso em: 22 jul. 2022.

FGVEnergia; BP STATISTICAL REVIEW. **Dados - Matriz Energética**. FGV. 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>. Acesso em: 26 abr. 2022.

FLØ, D.; KROKENE, P.; ØKLAND, B. **Invasion potential of Agrilus planipennis and other Agrilus beetles in Europe: import pathways of deciduous wood chips and MaxEnt analyses of potential distribution areas**. EPPO Bull, Parma (IT), v. 45, n.1 p. 259-268, jul. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/epp.12223>. Acesso em: 28 mai. 2022.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti. **Garantindo o suprimento futuro de madeira**. Revista Opiniões. 2013. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/4-garantindo-o-suprimento-futuro-de-madeira/#:~:text=A%20madeira%20pode%20ser%20considerada,e%20utilizadas%20pelo%20ser%20humano>. Acesso em: 05 ago. 2022

FONTELES, Julia. **União Europeia lidera política climática**. 2020. Poder 360. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniao/uniao-europeia-lidera-politica-climatica-diz-julia-fonteles/>. Acesso em: 16 jun. 2022.

FPL. **Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 f. 2010. Disponível em: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf. Acesso em: 28 mai. 2022.

FRANCO, Carlos Rodrigues. **Forest biomass potential for wood pellets production in the United States of America for exportation: a review**. Departamento de Agricultura dos EUA, 2021. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17597269.2022.2059951>. Acesso em: 21 jun. 2022.

FREITAS, Luís André de. **Análise técnico-econômica de produção de etanol por gaseificação direta de biomassa lignocelulósica**. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, xiv, 107 p., 2021.

FURTADO, Celso. **Formação Econômica do Brasil**. Editora Fundo de Cultura. Cia das Letras, São Paulo, 2006.

G1. **Guerra na Ucrânia faz países buscarem alternativas para crise no mercado de energia**. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2022/07/01/guerra-na-ucrania-faz-paises-buscaram-alternativas-para-crise-no-mercado-de-energia.ghtml> . Acesso em: 06 ago. 2022.

GARCIA, Dorival Pinheiro **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Guaratinguetá, Campus de Guaratinguetá, 101f., 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94403>. Acesso em: 28 mai. 2022.

GARCIA, Dorival Pinheiro et al. **Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis pellets**. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 12, n. 4, p. 333–339, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329786215_MAPA_DOS_PRODUTORES_BRASILEIROS_DE_BIOCOMBUSTIVEIS_PELLETS_MAP_OF_BRAZILIAN_BIOFUELS_PRODUCERS_PELLETS. Acesso em: 16 jun. 2022.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA**. Holos, v. 1, n. 32, p. 327–339, 2016a.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F.H.A. **Trends and challenges of origin brazilian agroforestry pellets industry**. Cerne, v. 22, n. 3, p. 233-240, 2016b.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **Estocagem: Uma vantagem dos pellets de madeira**. 2012. Blog Pellets de Madeira. Disponível em: <http://pelletsdemadeira.blogspot.com/2012/01/estocagem-uma-vantagem-dos-pellets-de.html>. Acesso em: 16 jun. 2022.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **O PROBLEMA DO CLORO NOS PELLETS DE EUCALIPTO**. 2019. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-problema-do-cloro-nos-pellets-de-eucalipto-dorival-pinheiro-garcia/>. Acesso em: 28 mai. 2022.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **Pellets de madeira na pequena propriedade**. 2011. Blog Pellets de Madeira. Disponível em: <http://pelletsdemadeira.blogspot.com/2011/12/pellets-de-madeira-na-pequena.html> Acesso em: 02 ago. 2022.

GENIN, Carolina; FRASSON, Caroline Medeiros Rocha. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo**. WRI Brasil. 2021.

Disponível em: <https://wribrasil.org.br/noticias/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 30 abr. 2022.

GLOBALCARBONATLAS. **CO2 Emissions**. 2020. Disponível em: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. Acesso em: 30 abr. 2022.

GOH, Chun Sheng; JUNGINGER, Martin. **Sustainable Biomass and bioenergy in the Netherlands: Report 2013**. Utrecht: Copernicus Institute; Utrecht University, 87 p., 2013.

GOLDEMBERG, José. **Proálcool: uma das maiores realizações do Brasil baseadas em ciência e tecnologia**. Entrevista concedida a Elton Alisson. Agência FAPESP. 2016. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

GOMES, Pedro Henrique. **Governo edita decreto que regulamenta mercado de créditos de carbono no Brasil**. G1 Política. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/politica/noticia/2022/05/19/governo-edita-decreto-que-regulamenta-mercado-de-creditos-de-carbono-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 02 set. 2022.

GOUVÊA, Adriana de Fátima Gomes. **Produção de briquete a partir da adição de lignina kraft com resíduo da indústria moveleira**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2012. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/582>. Acesso em: 28 mai. 2022.

GOVERNO DO PARANÁ. **Pellets de bagaço de cana da Raízen são exportados para o Reino Unido**. Entrevista para o jornal Nova Cana. 2021. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/etanol/mercado/exportacao/pellets-bagaco-cana-raizen-exportados-reino-unido-130121>. Acesso em: 15 ago. 2022.

HAHN, B. **Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel pellets - Pellets for Europe Project**. St. Polten, Áustria, 20f., 2004.

HEINIMO, J; JUNGINGERB, M. Production and trading of biomass for energy – An overview of the global status. Lappeenranta University of Technology, Biomass and Bioenergy, Finland, v.33, n.9, p. 1310-1320, Set.2009.

HOBBSAWM, Eric J. **Da Revolução Industrial Inglesa ao Imperialismo**. Rio de Janeiro: Forense-Universitária, 1979.

HOTELLING, Harold. **A General Mathematical Theory of Depreciation**.

IBÁ. **Relatório Anual IBÁ 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>. Acesso em: 16 mai. 2022.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020**. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Rio de Janeiro, v. 35, p. 1-8, 2020. Disponível em: https://www.aen.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/migrados/0610pevs_2020_v35_informativo.pdf. Acesso em: 07 mai. 2022.

IBGE. **IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 06 ago. 2022

ICC. **ICC's world-renowned Incoterms® rules facilitate trillions of dollars in global trade each year**. 2020. Disponível em: <https://iccwbo.org/resources-for-business/incoterms-rules/incoterms-2020/>. Acesso em: 09 jul. 2022.

IEA. **Bioenergy Power Generation**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>. Acesso em: 24 mai. 2022.

IEA. **Data and statistics**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD>. Acesso em: 24 mai. 2022.

IEE USP. **Fontes de biomassa**. 2022. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/fontes-de-biomassa>. Acesso em: 26 mai. 2022.

IEE USP. **Tecnologias de aproveitamento**. 2022. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/tecnologias-de-aproveitamento>. Acesso em: 05 mai. 2022.

IEMA. **Na contramão do mundo, Brasil aumentou emissões em plena pandemia**. 2021. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/na-contramao-do-mundo-brasil-aumentou-emissoes-em-plena-pandemia-20211028>. Acesso em: 02 mai. 2022.

IMAFLORA. **Certificações de pequenos produtores de madeira aumentam mais de seis vezes em 10 anos**. 2020. Disponível em: <https://www.imaflora.org/noticia/certificacoes-de-pequenos-produtores-de-madeira-aumentam-mais-de-seis-vezes-em-10-anos>. Acesso em: 06 ago. 2022.

IPCC. **INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE**. Climate Change 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 30 abr. 2022

IPCC. **INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE**. Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 30 abr. 2022

IPEA. **Brasil gera 45% de energia renovável e lidera transição energética no Brics**. 2021. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=38330&catid=1&Itemid=7%20. Acesso em: 02 mai. 2022.

IRS. **Publication 946 (2021), How To Depreciate Property**. 2021. Revisado em 2022. Disponível em: https://www.irs.gov/publications/p946#en_US_2020_publink100068700. Acesso em: 15 jul. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. **Perguntas Frequentes: Qual a potência da Itaipu?**. 2010. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas->

[frequentes#:~:text=A%20capacidade%20instalada%20\(pot%C3%Aancia\)%20da,700%20megawatts%20\(MW\)%20cada](#). Acesso em: 26 abr. 2022.

ITI. **Powering Innovation, Driving Growth**. 2020. Disponível em: <https://www.powering-innovation.org/see-the-report>. Acesso em: 29 jul. 2022.

IWPB. **An introduction to IWPB (Initiative of Wood Pellet Buyers): Developing a sustainable value chain for solid woody biomass in power generation**. 2013. Disponível em: <https://www.imp.gda.pl/bioenergy/bruksela/laborelec.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2022.

JACINTO, Rodolfo Cardoso. **Produção de pellets para energia usando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais**. Lages, 2017. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1484/Disserta_o_Rodolfo_Cardoso_Jacinto_15682105945705_1484.pdf. Acesso em: 10 mai. 2022.

JARANDILHA, Giovanna. **Green buildings: uma solução ecológica para a arquitetura das cidades**. 2021. CASACOR. Disponível em: <https://casacor.abril.com.br/sustentabilidade/o-que-e-green-building/>. Acesso em: 02 ago. 2022.

JENKINS, B.; BAXTER, L.L.; MILES JR, T.R.; MILES, T.R.. **Combustion properties of biomass, Biomass Usage for Utility and Industrial Power**. Utah, Ed Engineering Foundation Conferences, Fuel Processing Technology, v.54, n.9, p.17-47, nov. 1996.

KANURY, A.M. **Combustion characteristics of biomass fuels**. Combustion Science and Technology. New York, v.97, n.6, p.469-491, mai. 1994.

KIKUMOTO, Bruno. **Consumidores do grupo A faturados como grupo B**. Canal solar. 2019. Disponível em: [https://canalsolar.com.br/consumidores-do-grupo-a-faturados-como-grupo-b/#:~:text=O%20grupo%20A%20\(alta%20tens%C3%A3o,estabelecimentos%20comerciais%20de%20grande%20porte](https://canalsolar.com.br/consumidores-do-grupo-a-faturados-como-grupo-b/#:~:text=O%20grupo%20A%20(alta%20tens%C3%A3o,estabelecimentos%20comerciais%20de%20grande%20porte). Acesso em: 30 jul. 2022.

KOALA ENERGY. **Dicas para o armazenamento correto de Pellets de madeira**. 2022a. Disponível em: <https://www.koalaenergy.com.br/post/52/dicas-para-o-armazenamento-correto-de-pellets-de-madeira>. Acesso em: 16 jun. 2022.

KOALA ENERGY. **Operações feitas em Big Bags geram menor impacto ambiental e mais economia aos clientes**. 2022b. Disponível em: <https://www.koalaenergy.com.br/post/79/operacoes-feitas-em-big-bags-geram-menor-impacto-ambiental-e-mais-economia-aos-clientes>. Acesso em: 16 jun. 2022.

LABATE, Carlos Alberto. **As lições do eucalipto para a pesquisa e o desenvolvimento de árvores nativas**. Entrevista concedida ao Programa de Florestas. WRI Brasil. 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/07/licoes-do-eucalipto-para-pesquisa-e-o-desenvolvimento-de-arvores-nativas>. Acesso em: 26 mai. 2022.

LANDES, David S. **Progreso Tecnológico y Revolucion Industrial**. Madrid: Editorial Tecnos, 1979.

LIÉVANO, Andrés Bermúdez. **Um mapa das usinas termoeletricas da América Latina**. Diálogo Chino. 2020. Disponível em: <https://dialogochino.net/pt-br/mudanca-climatica-e-energia-pt-br/38222-mapa-energia-termoeletrica-america-latina-descarbonizacao-transicao-energetica/>. Acesso em: 09 jul. 2022.

MANUAL ENPLUS®. **Parte 3 - Requisitos de Qualidade do Pellet ENplus**. v. 3.0, 10p, ago., 2015.

MARCHAL, D., VAN STAPPEN, F., SCHENKEL, Y. **Critères et indicateurs de production « durable » des biocombustibles solides: état des lieux et recommandations**. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* v.13, n° 1, p. 165-176, 2009

MAROSTICA, Suelen Jorge Felizatto. **Indústria 4.0, Inovação e Sustentabilidade**. 2021. Disponível em: <https://via.ufsc.br/industria-4-0-inovacao-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 25 abr. 2022

MARTINI, Paulo Roberto Rodrigues. **Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos**. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/10457#:~:text=O%20uso%20do%20baga%C3%A7o%20de,a%20derivados%20de%20combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis>. Acesso em: 26 abr. 2022.

MELLO, M. G. **Biomassa - Energia dos Trópicos**. Minas Gerais, Belo Horizonte, LabMídia/FAFICH, 272 p., 2001.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, SECRETARIA DE PRODUÇÃO E AGROENERGIA. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. rev. - Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Perguntas frequentes sobre o manejo florestal comunitário**. 2016. Disponível em: <https://www.florestal.gov.br/perguntas-frequentes/68-fomento-florestal/475-perguntas-frequentes-sobre-o-manejo-florestal-comunitario>. Acesso em: 05 mai. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Protocolo de Quioto**. Traduzido pelo MCT. Brasília, DF, 1997. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/protocoloquioto.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2022

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Protocolo de manejo clínico do coronavírus (covid-19) na atenção primária à saúde**. Versão 9, Brasília, DF, Secretaria de Atenção Primária à Saúde (SAPS), mai. 2020. Disponível em: <https://saude.rs.gov.br/upload/arquivos/202004/14140606-4-ms-protocolomanejo-aps-ver07abril.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, DF: MME/EPE, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília, DF: Secretaria de qualidade ambiental, 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. **Wood pellet market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2022 - 2027)**. Free sample. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wood-pellet-market>. Acesso em: 21 jun. 2022.

MORAES, Michelly. **Biomassa: Entenda sua importância e os diferentes tipos!** AgroPós. 2022. Disponível em: <https://agropos.com.br/tipos-de-biomassa/>. Acesso em: 05 mai. 2022.

MOREIRA, Catarina. **Biosfera**, Revista de Ciência Elementar, v. 3, n. 2, 2f, jun. 2015. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/static/docs/artigos/2015-113.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

MOTA, Francisco; VIEGAS, Renan; LIMA, Auceliane; SANTOS, Francisco; CASELLI, Francisco. (2015). **Pirólise da biomassa lignocelulósica: uma revisão**. Revista Gestão Inovação e Tecnologias. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/287404935>. Acesso em: 26 mai. 2022.

MURRAY, Gordon. **Pellet Trading**. Wood Pellet Association of Canada. Disponível em: <http://www.pellet.org/wpac-news/pellet-trading>. Acesso em: 20 jun. 2022.

NEIVA, Jucy. **Conheça o petróleo**. Editora Ao Livro Técnico. Rio de Janeiro, Melhoramentos, 1966.

NETO, Antenor. **Marketplace: o que é, como funciona e as principais vantagens para o seu negócio**. Escola de E-commerce. 2022. Disponível em: <https://www.escoladeecommerce.com/artigos/o-que-e-marketplace/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

NIELSEN, H.; FRANDBSEN, F.; DAM-JOHANSEN, K.; BAXTER, L. **The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers**. Progress in energy and combustion science, Estados Unidos, v. 26, n. 3, p. 283-298, 2000.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, p. 52-63, 2008.

OLIVEIRA, Celso. **Processo Industrial de Produção de Pellets**. Blog Biomassa Bioenergia Pellets Energia. 2015. Brasil Biomassa e Energia Renovável. Disponível em: <https://abibbrasil.wixsite.com/blogbiomassa/single-post/2015/07/29/processo-industrial-de-produ%C3%A7%C3%A3o-de-pellets>. Acesso em: 08 jun. 2022.

OLIVEIRA, Mário Henrique da Fonseca. **A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de monte carlo e o vpl fuzzy**. São Carlos, p. 1-231, set. 2008. Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-03122009-090723/pt-br.php>. Acesso em: 18 jun. 2021.

OLSSON, M. **Emissions from burning of softwood pellets**. Biomass and Bioenergy. Goteborg, v.27, n.6, p.607-611, dez. 2004.

ONU. **Aquecimento global atinge níveis sem precedentes e dispara "alerta vermelho" para a humanidade.** 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/139401-aquecimento-global-atinge-niveis-sem-precedentes-e-dispara-alerta-vermelho-para-humanidade>. Acesso em: 30 abr. 2022.

ORECCHIO, Santino et al. **Wood pellets for home heating can be considered environmentally friendly fuels? Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in their ashes.** *Microchemical Journal*, v. 124, p. 267-271, jan. 2016.

OXFORD LANGUAGES. **Definição de energia.** Disponível em: <https://www.google.com/search?q=energia+significado>. Acesso em: 02 ago. 2022.

PATRÍCIO, Fernando Nunes. **Nossa dependência da energia elétrica e dos equipamentos eletroeletrônicos – seus benefícios e seus perigos.** 2020. Disponível em: <http://www.senge-pr.org.br/wp-content/uploads/2020/03/INTEGRA-A-energia-el%C3%A9trica-benef%C3%ADcios-e-riscos.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2022.

PELLETS@LAS. **Advancement of pellets-related European standards.** WIP Renewable Energies. Out. 2009. Disponível em: <https://bape.com.pl/wp-content/uploads/2014/09/Advancement-of-pellets-related-European-standards.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi, **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico.** Viçosa, MG, 74p. 2014.

PHILIPPI JUNIOR, A.; DOS REIS, L. B. **Energia e Sustentabilidade.** Barueri: Manole, Coleção Ambiental, 1021 p., v. 19, 2016.

PIERRE, Tatiana Dillenburg Saint. **Arquimedes.** 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/60005835-Arquimedes-tatiana-dillenburg-saint-pierre-este-documento-tem-nivel-de-compartilhamento-de-acordo-com-a-licenca-3-0-do-creative-commons.html>. Acesso em: 20 abr. 2022.

PINEL, J. **La filière pellets en France: une filière à structurer dans un contexte d'internationalisation rapide du marché.** Paris: E-CUBE strategy consultants, 12 p., 2013.

PIRRAGLIA, Adrian et al. **Fuel properties and suitability of *Eucalyptus Benthamii* and *Eucalyptus Macarthurii* for torrefied wood and pellets.** *BioResources*, Raleigh, v. 7, n. 1, p. 217-235, 2012. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_07_1_0217_Pirraglia_GSWD_Fuel_Eucalypt_Torrefied_Wood_Pellets_2007.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

PIRRAGLIA, Adrian et al. **Techno-economical analysis of wood pellets production for u.s. manufacturers.** *BioResources*, Raleigh. 2010 Disponível em: <https://mail.google.com/mail/u/0/#search/fl/FMfcgzGpGdhDfMHTWcfsmzPdhWdQgBbV?projector=1&messagePartId=0.4>. Acesso em: 20 jun. 2022.

POMPEU, Gabriela Ciribelli Santos. **Estudo do conteúdo calorífico de ligninas extraídas de diferentes fontes de biomassa vegetal.** Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 54 f, 2019.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 26 abr. 2022.

POSSAS, Maria Silvia. **Concorrência e Competitividade: Notas Sobre Estratégia e Dinâmica Seletiva na Economia Capitalista**. Tese de doutorado. UNICAMP, pp. 70-71, 1993. Disponível em: <https://buscaintegrada.ufrj.br/Record/aleph-UFR01-000093158>. Acesso em: 09 jul. 2022.

PROBSTEIN, Ronald F.; HICKS, R. Edwin. **Synthetic Fuels**. 1st Edition. New York: McGraw Hill Book Company, 1982.

PROCLIMA. **Gases do Efeito Estufa**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 25 jul. 2022.

QIAN, Yifei, MCDOW, Will. **The Wood Pellet Value Chain - An economic analysis of the wood pellet supply chain from the Southeast United States to European Consumers**. The US Endowment for Forestry and Communities. [S.L]: 59f., mar. 2013. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.401.4285&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 30 jun. 2022.

QUEIROZ, Felipe. **Entenda a crise hídrica que ameaça o fornecimento de energia no Brasil**. Entrevista concedida a Israel Medeiros. Correio Braziliense. 2021. Disponível em: <https://www.correio braziliense.com.br/brasil/2021/06/4931467-entenda-a-crise-hidrica-que-ameaca-o-fornecimento-de-energia.html>. Acesso em: 23 mai. 2022.

QUÉNO, L. R. M. (2015). **Produção de Pellets de Madeira no Brasil: Estratégia, Custo e Risco do Investimento**. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Publicação PPG EFL. DM-132/09, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20726/1/2015_LaurentRogerMarieQu%C3%A9no.pdf. Acesso em: 17 mai. 2022.

RAKOS, C. **Argus questions and answers: European Pellet Council**. Argus Biomass Markets, Weekly Biomass Market News and Analysis, London, n. 15-002, 2015.

RECEITA FEDERAL. **Contribuição Social sobre o Lucro Líquido CSLL**. 2015b. Revisado em 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/CSLL>. Acesso em: 22 jul. 2022.

RECEITA FEDERAL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA SRF Nº 162, DE 31 DE DEZEMBRO DE 1998**. 1998. Disponível em: <http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=15004&visao=original>. Acesso em: 15 jul. 2022.

RIFKIN, Jeremy. **A Terceira Revolução Industrial – Como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo**. São Paulo: M. Books do Brasil, 2021.

RUIZ, E. T. N. F. **Análise de investimento em projetos Greenfield de bioenergia**. Campinas: Alínea, 334 p., 2015.

SACHS, Ignacy. **Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde. Estudos Avançados**, FapUNIFESP, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/4pVnGBGkZGPs4wCVsJVdNR/?lang=pt> . Acesso em: 23 mai. 2022.

SANTOS, F. A. **Potencial da Palha de Cana-de-Açúcar para Produção de Etanol**. Química Nova. v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SANTOS, Leon. **Conheça as quatro Revoluções Industriais que moldaram a trajetória do mundo**. Assessoria de Comunicação do CFA. 2019. Disponível em: <https://cfa.org.br/as-outras-revolucoes-industriais/>. Acesso em: 20 abr. 2022.

SCHAEFFER, Roberto; NOGUEIRA, Luiz Alberto Horta. **Tupi pode emitir até 3,3 bilhões de toneladas de CO₂**. Entrevista concedida a Herton Escobar. O estado de S. Paulo. 2009. Disponível em: <https://emails.estadao.com.br/noticias/geral,tupi-pode-emitir-ate-3-3-biloes-de-t-de-co2,376317#:~:text=Cada%20barril%20de%20petr%C3%B3leo%20queimado,%2C%20transporte%2C%20refino%20e%20distribui%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 20 abr. 2022.

SCHOUWENBERG, P.P. **Transforming wood pellets into a global commodity**. In “Global Wood Pellet Industry Market And Trade Study”. IEA Bioenergy. Task 40: Sustainable International Bioenergy Trade. 190p., 2011. Disponível em: https://task40.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/29/2013/09/t40-global-wood-pellet-market-study_final_R.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

SCHUMER, Clea et al. **6 conclusões do relatório do IPCC de 2022 sobre mitigação das mudanças climáticas**. WRI Brasil. 2022. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/noticias/6-conclusoes-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-mitigacao-das-mudancas-climaticas>. Acesso em: 02 ago. 2022.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. [s. l.], Currency, 2017.

SIMÕES, V.P.M. **Produção de briquetes de varvão vegetal com alcatrão de madeira**. 2000. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/2148?show=full>. Acesso em: 05 mai. 2022.

SOLIDES. **Como fazer o cálculo do custo do funcionário? Aprenda aqui!**. 2022. Disponível em: <https://blog.solides.com.br/como-fazer-o-calculo-do-custo-do-funcionario/>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SOLUMAD. **Análises mais importantes para a caracterização da biomassa como combustível**. 2018. Disponível em: https://solumad.com.br/noticia/view_noticia?id=21. Acesso em: 10 mai. 2022.

SOPHA, B.M., KLÖCKNER, C.A. **Psychological factors in the diffusion of sustainable technology: A study of Norwegian households' adoption of wood pellet heating**. Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 15, n. 6, p. 2756–2765, 2011

SPANHOL, Alana; NONES, Daniela Letícia, KUMABE, Fabricio Junki Blanco, BRAND, Martha Andreia. **Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em santa catarina para a geração de energia**. Floresta, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 833 - 844, out. 2015.

SZWARCFITER, Cláudio; DALCOL, Paulo Roberto T. **Economias de escala e de escopo: Desmistificando alguns aspectos da transição**. Production, v. 7, n. 2, p117-129, dez.1997.

TABARÉS, J.; ORTIZ, L.; GRANADA, E.; VIAR, F.P. **Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes)**. FUEL, Oviedo, Spain, v.79, n.10, p. 1229-1237, jun. 2000.

TESOURO NACIONAL. **Tesouro direto**. 2022b. Disponível em: <https://www.tesourodireto.com.br/>. Acesso em: 26 jul. 2022.

TESOURO NACIONAL. **Tudo o que você precisa saber sobre o tesouro**. 2022a. Disponível em: <https://www.tesourodireto.com.br/conheca/conheca-o-tesouro-direto.htm>. Acesso em: 26 jul. 2022.

THE WORLD BANK. **Perspectivas Econômicas Globais**. 2022. Disponível em: <https://www.worldbank.org/pt/publication/global-economic-prospects>. Acesso em: 02 mai. 2022.

TOMASELLI, Ivan. **O crescimento europeu da demanda de pellets e a oportunidade para os produtores brasileiros**. 2021. Disponível em: https://www.stcp.com.br/wp-content/uploads/2021/06/ref_florestal_jun21.pdf. Acesso em: 21 jun. 2022.

TOWLER, Gavin; SINNOTT, Ray. **Chemical Engineering Design: principles, practice, economics of plant and process design**. [S.L]: Elsevier, 2008.

TRØMBORG, E. et al. **Economic sustainability for wood pellets production: a comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US**. Biomass & Bioenergy, Amsterdam, v. 57, p. 68-77, 2013

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

TUMULURU, Jaya Shankar. **Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover**. Biosystems Engineering, v. 119, p. 44-57, 2014.

UOL. **Crise financeira: um colapso que ameaçou o capitalismo**. 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/bbc/2021/10/10/crise-financeira-colapso-que-ameacou-o-capitalismo.htm>. Acesso em: 29 jul. 2022.

VALE, Ailton Teixeira do; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M. de; VEIGA, R. A. de A. **Produção de energia do fuste de Eucalyptus grandis Hill Ex-Maiden e acácia mangium Willd em diferentes níveis de adubação**. Cerne, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83 - 88, 2000.

VERHOEST, Chrystelle; RYCKMANS, Yves. **Industrial Wood Pellets Report**. PELLCERT, 2012. Disponível em: [http://www.bpa-intl.com/images/stories/present-1/PELLCERT%20-%20Industrial%20Wood%20Pellets%20Report%20\(2012\).pdf](http://www.bpa-intl.com/images/stories/present-1/PELLCERT%20-%20Industrial%20Wood%20Pellets%20Report%20(2012).pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.

VIOLA, Eduardo. **Os EUA estão fora do Acordo de Paris. Saiba por que isso é mais regra que exceção**. Entrevista concedida a Jaqueline Sordi. O eco. 2020. Disponível em: <https://oeco.org.br/noticias/os-eua-estao-fora-do-acordo-de-paris-saiba-por-que-isso-e-mais-regra-que-excecao/>. Acesso em: 30 abr. 2022.

WEBER, Alfred. **Theory of Location of Industries**. Chicago, Illinois. The University Of Chicago Press, 1929. Disponível em: <http://www.economia.unam.mx/cedrus/descargas/Libro%20de%20Weber.pdf>. Acesso em: 3 maio 2021.

WIHERSAARI, M.; AGAR, D.; KALLIO, M. **Scenario analysis of fuel-pellet production –the influence of torrefaction on material flows and energy balances**. Uppsala, Sweden. Set. 2009. Disponível em: <http://www.innovawood.com/Portals/0/documents/Margareta%20Wihersaari.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.worldbioenergy.org/global-bioenergy-statistics/>. Acesso em: 20 mai. 2022.

Apêndice A

Cenário de cada ano do projeto

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Atuação da fábrica (meses)	0	0	0	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6
Capacidade instalada (t/ano)	-	-	-	37.500	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	37.500
% do IF aplicado	20%	40%	40%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
% do IF acumulado	20%	60%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
% taxa de ocupação	0%	0%	0%	40%	70%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t/ano)	-	-	-	15.000	52.500	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	37.500
Venda (t/ano)	-	-	-	15.000	52.500	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000	37.500

Fonte: Elaboração própria

Apêndice B

Descrição dos itens individuais do investimento ajustados no cenário do projeto

Item	Número de itens requeridos	Custo unitário nos EUA em 2009 (mil US\$/equipamento)	Custo de instalação nos EUA em 2009 (mil US\$/equipamento)	Custo total de equipamentos nos EUA em 2009 (mil US\$)	Custo total de instalação nos EUA em 2009 (mil US\$)	Custo total de equipamentos + Custo total de instalação nos EUA em 2009 (mil US\$)	Custo total de equipamentos + Custo total de instalação nos EUA em 2020 (mil US\$)	Custo total de equipamentos + Custo total de instalação no Brasil em 2020 (mil US\$)	Custo total de equipamentos + Custo total de instalação no Brasil em 2020 (US\$)	Custo total de equipamentos + Custo total de instalação no Brasil em 2020 (R\$)
Transportadores e equipamentos diversos	8	\$ 29,00	\$ 10,00	\$ 228,00	\$ 78,00	\$ 307,00	\$ 365,10	\$ 413,94	\$ 413.936,76	R\$ 2.231.160,79
Carregador frontal	2	\$ 113,00	N/A	\$ 226,00	N/A	\$ 226,00	\$ 267,30	\$ 304,72	\$ 304.722,18	R\$ 1.643.935,50
Moega	13	\$ 10,00	\$ 4,00	\$ 132,00	\$ 54,00	\$ 186,00	\$ 219,99	\$ 250,79	\$ 250.789,05	R\$ 1.352.989,92
Secador, queimador e sistema de ar	5	\$ 140,00	\$ 204,00	\$ 700,00	\$ 1.020,00	\$ 1.720,00	\$ 2.034,33	\$ 2.319,12	\$ 2.319.124,52	R\$ 12.511.519,71
Moinho de martelo	2	\$ 55,00	\$ 78,00	\$ 110,00	\$ 157,00	\$ 267,00	\$ 315,79	\$ 360,00	\$ 360.003,63	R\$ 1.942.195,21
Silo de fundo dinâmico	13	\$ 175,00	\$ 14,00	\$ 2.275,00	\$ 181,00	\$ 2.456,00	\$ 2.904,82	\$ 3.311,49	\$ 3.311.494,08	R\$ 17.865.286,29
Peletizadora	2	\$ 533,00	\$ 168,00	\$ 1.070,00	\$ 336,00	\$ 1.406,00	\$ 1.662,94	\$ 1.895,75	\$ 1.895.749,46	R\$ 10.227.439,95
Resfriador	2	\$ 150,00	\$ 37,00	\$ 390,00	\$ 73,00	\$ 463,00	\$ 541,16	\$ 602,93	\$ 602.926,42	R\$ 2.713.253,98
Peneira agitadora	2	\$ 15,00	\$ 40,00	\$ 29,00	\$ 79,00	\$ 109,00	\$ 128,92	\$ 146,97	\$ 146.967,77	R\$ 792.881,19
Boiler (500 kWh)	4	\$ 110,00	\$ 1,00	\$ 440,00	\$ 4,00	\$ 444,00	\$ 525,14	\$ 598,66	\$ 598.657,72	R\$ 3.229.717,88
Terreno para a indústria e preparação do terreno	1	\$ 156,00	N/A	\$ 156,00	N/A	\$ 156,00	\$ 184,51	\$ 210,34	\$ 210.339,20	R\$ 1.134.785,74
Pavimentação, sistema de recebimento, área de carregamento	1	\$ 60,00	N/A	\$ 60,00	N/A	\$ 60,00	\$ 70,96	\$ 80,90	\$ 80.899,69	R\$ 436.448,36
Edifício e escritório	1	\$ 1.020,00	N/A	\$ 1.020,00	N/A	\$ 1.020,00	\$ 1.206,40	\$ 1.375,29	\$ 1.375.294,77	R\$ 7.419.622,15
Armazém	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	\$ 77,52	\$ 91,69	\$ 104,52	\$ 104.522,40	R\$ 561.891,28
Custos indiretos	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	\$ 2.113,80	\$ 2.500,09	\$ 2.850,10	\$ 2.850.102,64	R\$ 15.376.110,71

Fonte: Elaboração própria a partir do modelo de Pirraglia et al. (2009), CWCCIS (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2021), BACEN (2022) e TOWLER; SINNOTT, 2008

Apêndice D

Descrição dos itens do investimento ajustados no cenário do projeto

Item	Brasil, 2020 (R\$)
Investimento das unidades industriais (UI)	R\$ 67.129.445,74
Contingência (10% UI)	R\$ 6.712.944,57
Custo de engenharia (12% UI)	R\$ 8.055.533,49
Custo de tecnologia (5% UI)	R\$ 3.356.472,29
Custo de partida (CV para 1 mês de operação)	R\$ 2.835.721,80
Investimento fixo (IF)	R\$ 88.090.117,90
Capital de giro (15% IF)	R\$ 13.213.517,68
Investimento total	R\$ 101.303.635,58

Fonte: Elaboração própria a partir do modelo de Pirraglia et al. (2009), CWCCIS (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2021), BACEN (2022) e TOWLER; SINNOTT, 2008

Apêndice E

DRE

DRE																
Ano		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Receita líquida	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 17.827.640,25	R\$ 62.396.740,88	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 44.369.100,63
Custo de produção	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 22.461.469,79	R\$ 39.475.800,61	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 49.684.399,11	R\$ 32.670.068,28
Custo variável	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 6.805.732,33	R\$ 23.820.063,16	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 17.014.330,83
Custo fixo	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45
Despesa operacional	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 862.557,90	R\$ 3.018.952,66	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 2.156.394,76
Depreciação (R\$/ano)	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 8.809.011,79	R\$ 15.856.221,22	R\$ 12.084.976,98	R\$ 10.147.981,58	R\$ 8.121.908,87	R\$ 6.492.241,69	R\$ 5.769.902,72	R\$ 5.778.711,73	R\$ 5.769.902,72	R\$ 2.889.355,87
Lucro líquido antes do IR (L)	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 14.305.399,23	R\$ 4.045.766,38	R\$ 22.456.035,65	R\$ 24.993.031,04	R\$ 27.019.103,76	R\$ 28.648.770,94	R\$ 29.371.109,90	R\$ 29.371.109,90	R\$ 29.362.300,89	R\$ 29.371.109,90
IR																
34% se LL > R\$ 20.000	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 1.375.560,57	R\$ 7.635.052,12	R\$ 8.497.630,55	R\$ 9.186.495,28	R\$ 9.740.582,12	R\$ 9.986.177,37	R\$ 9.986.177,37	R\$ 2.330.115,78
24% se LL < R\$ 20.000																
Lucro depois do IR	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$ 14.305.399,23	R\$ 2.670.205,81	R\$ 14.820.983,53	R\$ 16.495.400,49	R\$ 17.832.608,48	R\$ 18.908.188,82	R\$ 19.384.932,54	R\$ 19.384.932,54	R\$ 19.379.118,59	R\$ 10.384.932,54

Fonte: Elaboração própria a partir das considerações da metodologia descrita na seção 3.6

Apêndice F

Fluxo de caixa, VPL e TIR

Fluxo de caixa														
Entradas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Receita de vendas	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 17.827.640,25	R\$ 62.396.740,88	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 44.569.100,63
Capital de giro recuperado	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 13.213.517,68
Entradas totais	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 17.827.640,25	R\$ 62.396.740,88	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 89.138.201,25	R\$ 57.782.618,31
Saídas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Custos variáveis	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 6.805.732,33	R\$ 23.820.063,16	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 34.028.661,65	R\$ 17.014.330,83
Custos fixos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45	R\$ 15.655.737,45
Despesas operacionais	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 862.557,90	R\$ 3.018.952,66	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 4.312.789,52	R\$ 2.156.394,76
Investimento fixo	R\$ 17.618.023,58	R\$ 35.236.047,16	R\$ 35.236.047,16											
Capital de giro				R\$ 13.213.517,68										
IR	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.375.560,57	R\$ 7.635.052,12	R\$ 8.497.630,55	R\$ 9.186.495,28	R\$ 9.740.582,12	R\$ 9.986.177,37	R\$ 9.986.177,37	R\$ 9.983.182,30	R\$ 9.986.177,37	R\$ 2.330.115,78
Valor total das saídas	R\$ 17.618.023,58	R\$ 35.236.047,16	R\$ 35.236.047,16	R\$ 36.537.545,37	R\$ 43.870.313,84	R\$ 61.032.240,75	R\$ 62.494.819,18	R\$ 63.183.683,90	R\$ 63.737.770,74	R\$ 63.983.365,99	R\$ 63.983.365,99	R\$ 63.980.370,93	R\$ 63.983.365,99	R\$ 37.156.578,82
FC	-R\$ 17.618.023,58	-R\$ 35.236.047,16	-R\$ 35.236.047,16	-R\$ 18.709.905,12	R\$ 18.526.427,03	R\$ 27.505.960,50	R\$ 26.643.382,07	R\$ 25.954.517,35	R\$ 25.400.430,51	R\$ 25.154.835,26	R\$ 25.154.835,26	R\$ 25.157.830,32	R\$ 25.154.835,26	R\$ 20.626.039,49
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Valores levados ao presente	-R\$ 17.618.023,58	-R\$ 31.157.526,89	-R\$ 27.551.089,30	-R\$ 12.935.969,20	R\$ 11.326.477,17	R\$ 14.869.822,85	R\$ 12.736.324,87	R\$ 10.970.932,14	R\$ 9.493.961,03	R\$ 8.313.877,88	R\$ 7.351.558,83	R\$ 6.501.400,78	R\$ 5.748.188,86	R\$ 4.167.745,51
VPL	R\$ 2.217.680,94													
TIR		13,54%												

Fonte: Elaboração própria a partir das considerações da metodologia descrita na seção 3.6 e 3.7.

Apêndice G

Payback descontado

PAYBACK DESCONTADO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FC descontado	-R\$ 17.618.023,58	-R\$ 31.157.526,89	-R\$ 27.551.089,30	-R\$ 12.935.969,20	R\$ 11.326.477,17	R\$ 14.869.822,85	R\$ 12.736.324,87	R\$ 10.970.932,14	R\$ 9.493.961,03	R\$ 8.313.877,88	R\$ 7.351.558,83	R\$ 6.501.400,78	R\$ 5.748.188,86	R\$ 4.167.745,51
FC descontado acumulado	-R\$ 17.618.023,58	-R\$ 48.775.550,47	-R\$ 76.326.639,77	-R\$ 89.262.608,97	-R\$ 77.936.131,80	-R\$ 63.066.308,95	-R\$ 50.329.984,08	-R\$ 39.359.051,94	-R\$ 29.865.090,91	-R\$ 21.551.213,03	-R\$ 14.199.654,20	-R\$ 7.698.253,43	-R\$ 1.950.064,57	R\$ 2.217.680,94
													Intepolando	13,47

Fonte: Elaboração própria a partir das considerações da metodologia descrita na seção 3.8.