



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA**



**ANDRÉ LUIZ TEIXEIRA DE ARAÚJO PACHECO
RENATO MALBAR MUSIELLO BARCELLOS**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE
POLIÁCIDO LÁTICO A PARTIR DE MELAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE
FORMA INTEGRADA À INDÚSTRIA AÇUCAREIRA**

Rio de Janeiro, RJ
2021

ANDRÉ LUIZ TEIXEIRA DE ARAÚJO PACHECO
RENATO MALBAR MUSIELLO BARCELLOS

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE
POLIÁCIDO LÁTICO A PARTIR DE MELAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DE
FORMA INTEGRADA À INDÚSTRIA AÇUCAREIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Química da Escola de
Química da Universidade Federal do Rio de
Janeiro como requisito parcial para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Fábio de Almeida Oroski

Rio de Janeiro, RJ
2021

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer, primeiramente, aos nossos pais e familiares por todo apoio e suporte que nos deram ao longo de todos os anos da nossa graduação.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em especial ao corpo docente da Escola de Química, pela oportunidade de estudar em um centro acadêmico de grande prestígio e tradição, bem como por todas as demais oportunidades e experiências que nos foram oferecidas.

Ao nosso orientador, Fábio de Almeida Oroski, por sua pronta disponibilidade, serenidade e orientações, sem as quais não teria sido possível concluir este trabalho.

Aos nossos amigos e colegas, por compartilhar conosco momentos e experiências memoráveis e verdadeiramente preciosos para nós.

E a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a nossa formação, deixamos o nosso muito obrigado.

RESUMO

A crescente conscientização ambiental na sociedade, em empresas e governos cria oportunidades para o desenvolvimento de soluções à problemática dos plásticos, incluindo a redução do uso, a reciclagem e os bioplásticos. O polímero ácido láctico (PLA), produzido a partir do ácido láctico, é um termoplástico que apresenta diversas propriedades comparáveis às dos plásticos de origem fóssil e possui potencial de aplicação em diversas áreas, além de ser biodegradável em condições de compostagem industrial. Em 2019, a produção mundial de PLA chegou a mais de 290 mil toneladas. Todavia, não há produção local do polímero e o mercado no Brasil é insignificante. No entanto, é relevante a experiência brasileira com rotas fermentativas, inclusive do ácido láctico, além da grande disponibilidade de matérias-primas. Neste trabalho, objetiva-se avaliar a viabilidade técnico-econômica de produção de PLA no Brasil a partir de melaço em processo integrado a uma planta de produção de açúcar, em direção a um modelo de biorrefinaria. A rota de obtenção do ácido láctico consiste em processo de fermentação com produção de gesso, e a polimerização do PLA é feita via abertura de anel. A avaliação do mercado de PLA apresentou projeções de crescimento global, principalmente nos setores de embalagem, têxtil e automobilístico. Em contrapartida, o mercado brasileiro se revelou muito limitado. A localização da planta foi determinada preliminarmente como o estado de São Paulo, por possui a maior concentração de produtores de açúcar, portos para a exportação e setores de transformados plásticos. No cenário base, chegou-se a um valor de VPL igual a R\$ 198 020 088,43, com TIR igual a 13,52%. As análises de sensibilidade mostraram que desvios entre 10% e 15% dos valores inicialmente utilizados para preço de venda, investimento e fator de localização podem inviabilizar o projeto. Para um cenário em que a perda de receita de melaço é contabilizada, o projeto torna-se muito menos atraente, com TIR de apenas 6,32%. O possível tempo necessário para desenvolvimento de mercado no país é fator desestimulador para o projeto. Assim, as incertezas do modelo de produção proposto, aliadas às limitações mercadológicas brasileiras, levam a conclusão de que os riscos do projeto se apresentam muito elevados para a realização nos moldes estabelecidos nesse trabalho.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 1 | Visualização gráfica da definição de bioplásticos - adaptado de European Bioplásticos (2018a). | 35 |
| Figura 2 | Estrutura química dos enantiômeros do ácido láctico (AURAS, HARTE, et al., 2004). | 40 |
| Figura 3 | Reações envolvidas na produção de ácido láctico via rota química (adaptado de NARAYANAN, ROYCHOUDHURY, et al., 2004). | 41 |
| Figura 4 | Rotas de síntese do PLA (GARLOTTA, 2001). | 45 |
| Figura 5 | Formação do anel lactídeo (GARLOTTA, 2001). | 47 |
| Figura 6 | Estrutura química a) PLLA, b) PDLA c) PDLLA (CHAN, VANDI, et al., 2018). | 48 |
| Figura 7 | Hidrólise do PLA (AURAS, HARTE, et al., 2004). | 51 |
| Figura 8 | Diagrama de blocos do processo de obtenção do ácido láctico (Adaptado de MANANDHAR e SHAH, 2020). | 56 |
| Figura 9 | Fluxograma do processo de produção do PLA (KWAN, HU, et al., 2018). | 57 |
| Figura 10 | Quadro do modelo de negócios Canvas. | 74 |
| Figura 11 | Percentuais representativos dos elementos componentes do custo fixo. | 87 |
| Figura 12 | Variação do VPL com a sensibilização da TMA. | 99 |
| Figura 13 | Sensibilização do VPL com variação do investimento fixo. | 100 |
| Figura 14 | Sensibilização da TIR com variação do investimento fixo. Linha pontilhada representa a localização do cenário base. | 100 |
| Figura 15 | Sensibilização do VPL com variação do preço de venda de PLA. | 102 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figura 16 | Sensibilização da TIR com variação do preço de venda de PLA. Linha pontilhada representa a localização do cenário base. | 102 |
| Figura 17 | Sensibilização do VPL com variação da taxa ocupação inicial. | 104 |
| Figura 18 | Sensibilização da TIR com variação da taxa ocupação inicial. Linha pontilhada representa a localização do cenário base. | 104 |
| Figura 19 | Sensibilização do VPL com variação do fator de localização. | 106 |
| Figura 20 | Sensibilização da TIR com variação do fator de localização. Linha pontilhada representa a localização do cenário base. | 106 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | Índices de Custo para Plantas adaptado de INTRATEC (2021). | 28 |
| Tabela 2 | Porcentagens típicas do investimento fixo para custos diretos e indiretos (PETERS, TIMMERHAUS, 1991). | 29 |
| Tabela 3 | Relações empíricas dos componentes do investimento fixo como descritas por (TOWLER, SINNOTT, 2013). | 30 |
| Tabela 4 | Propriedades do PLA e outros polímeros. Adaptado de Cipriano (2013). | 49 |
| Tabela 5 | Principais aplicações do PLA. Elaboração própria. | 51 |
| Tabela 6 | Capacidade produtiva e localização das principais plantas produtoras de PLA no mundo. (Adaptado de Jem e Tan, 2020). | 58 |
| Tabela 7 | Valor FOB e massa importada de PLA ao ano no Brasil (Ministério da Economia, 2020). | 62 |
| Tabela 8 | Número de empregados e porcentagem do total por unidade federativa do Brasil. (ABIPLAST, 2019). | 64 |
| Tabela 9 | Principais municípios produtores de etanol e capacidade instalada no estado de São Paulo no ano de 2017 (ANP, 2017). | 66 |
| Tabela 10 | Distâncias da capital e dos principais municípios produtores de etanol no estado de São Paulo até o município de Santos. | 68 |
| Tabela 11 | Atualização de custo de equipamentos principais da planta de produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar. | 77 |
| Tabela 12 | Atualização do investimento fixo da planta de produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar. | 77 |
| Tabela 13 | Atualização do investimento fixo da planta de produção de PLA a partir de ácido láctico. As porcentagens utilizadas para cálculo dos itens foram adaptadas de KWAN, HU, et al. (2018). | 79 |
| Tabela 14 | Atualização do investimento fixo de acordo com a escala e localização. | 80 |
| Tabela 15 | Porcentagens do investimento fixo para custos diretos e indiretos para a planta descrita por Manandhar e Shah (2019). | 80 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabela 16 | Porcentagens do investimento fixo para custos diretos e indiretos para a planta descrita por Kwan et al. (2018). | 81 |
| Tabela 17 | Coeficientes técnicos e custos de matérias-primas para produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar – para ocupação igual a 100%. | 82 |
| Tabela 18 | Coeficientes técnicos e custos de matérias-primas para produção de PLA a partir de ácido láctico – para ocupação igual a 100%. | 83 |
| Tabela 19 | Composição do custo variável para a produção de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar para uma ocupação teórica de 100%. | 84 |
| Tabela 20 | Custo fixo para produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar. | 85 |
| Tabela 21 | Custo fixo para produção PLA a partir de ácido láctico. | 86 |
| Tabela 22 | Custo fixo para a produção de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar. | 87 |
| Tabela 23 | Receita total esperada para todos os fluxos de caixa do projeto estudado. | 88 |
| Tabela 24 | Demonstrações de resultado do exercício do ano 2 ao 8. | 89 |
| Tabela 25 | Demonstrações de resultado do exercício do ano 8 ao 15. | 89 |
| Tabela 26 | Demonstrações de resultado do exercício do ano 16 ao 21. | 90 |
| Tabela 27 | Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melaço) do ano 0 ao 7. | 91 |
| Tabela 28 | Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melaço) do ano 8 ao 15. | 92 |
| Tabela 29 | Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melaço) do ano 16 ao 21. | 93 |
| Tabela 30 | Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 0 ao 7. | 95 |
| Tabela 31 | Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 8 ao 15. | 96 |

Tabela 32 Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 16 ao 21.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIÇÕES

| | |
|---------|--|
| ABIQUIM | Associação Brasileira da Indústria Química |
| ABRE | Associação Brasileira de Embalagens |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| CSLL | Contribuição Social do Lucro Líquido |
| DRE | Demonstração do resultado do exercício |
| EPS | Poliestireno expandido |
| EVTE | Estudo de Viabilidade Técnico-econômica |
| FOB | <i>Free on Board</i> |
| IPCA | Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEA | Instituto de Economia Agrícola |
| IF | Investimento fixo |
| ILOS | Instituto de Logística e <i>Supply Chain</i> |
| IR | Imposto de renda |
| ISBL | <i>Inside Battery Limits</i> |
| LDPE | Polietileno de baixa densidade |
| OCDE | Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| OSBL | <i>Outside Battery Limits</i> |
| PBAT | Polibutileno adipato tereftalato |
| PDLA | Poli-d-ácido láctico |
| PDLLA | Poli-d,l-ácido láctico |
| PE | Polietileno |
| PEA | Polietileno adipato |
| PEF | Polietileno furanoato |
| PET | Politereftalato de etileno |
| PGA | Poli(ácido glicólico) |
| PHA | Polihidroxialcanoato |
| PHB | Polihidroxibutirato |

| | |
|-------|---|
| PLA | Poli(ácido láctico) |
| PLLA | Poli-d-ácido láctico |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| PTMAT | Poli(metileno adipato-co-tereftalato) |
| PVA | Poliacetato de vinila |
| TIR | Taxa interna de retorno |
| TJLP | Taxa de Juros de Longo Prazo |
| TLP | Taxa de Longo Prazo |
| TMA | Taxa mínima de atratividade |
| UNEP | <i>United Nations Environment Programme</i> |
| VPL | Valor presente líquido |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| I. INTRODUÇÃO | 14 |
| II. MATERIAIS E MÉTODOS | 18 |
| <i>II.1. Análise Bibliográfica Exploratória</i> | 18 |
| <i>II.2. Projeção de Demanda Brasileira</i> | 18 |
| <i>II.3. Estudo de Localização</i> | 19 |
| <i>II.3.1. Principais Custos Logísticos</i> | 19 |
| <i>II.3.2. Principais Parâmetros para o Estudo de Localização</i> | 20 |
| <i>II.4. Modelo de Negócios</i> | 21 |
| <i>II.5. Estudo de Viabilidade Econômica</i> | 25 |
| <i>II.5.1. Fluxos de Caixa</i> | 26 |
| <i>II.5.2. Valor Presente Líquido (VPL)</i> | 26 |
| <i>II.5.2.1 Investimento total</i> | 27 |
| <i>II.5.2.2 Custo de produção</i> | 30 |
| <i>II.5.2.4 Receitas Operacionais</i> | 32 |
| <i>II.5.2.3 Imposto de Renda</i> | 32 |
| <i>II.5.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)</i> | 33 |
| <i>II.5.4 Análise de Sensibilidade</i> | 34 |
| III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 34 |
| <i>III.1. Os Bioplásticos</i> | 34 |
| <i>III.2. Histórico da Produção do PLA</i> | 37 |
| <i>III.3. Síntese do PLA</i> | 39 |
| <i>III.3.1. Síntese do Ácido Lático</i> | 39 |
| <i>III.3.2. Síntese do Políácido Lático</i> | 44 |
| <i>III.4. Características Físico-químicas do PLA</i> | 47 |
| <i>III.5. Descrição do Processo Produtivo Escolhido</i> | 52 |
| <i>III.5.1 Matéria-prima</i> | 52 |
| <i>III.5.2 Produção de ácido lático</i> | 54 |

| | |
|---|-----------|
| III.5.3 <i>Produção de PLA</i> | 56 |
| IV. OFERTA E DEMANDA DE POLIÁCIDO LÁTICO | 58 |
| IV.1. <i>Cenário Atual do Poliacido Lático no Mundo</i> | 58 |
| IV.2. <i>Possível Demanda Interna de PLA</i> | 61 |
| V. ESTRUTURAÇÃO DA OPORTUNIDADE NO CASO BRASILEIRO | 65 |
| V.1. <i>Estudo de Localização</i> | 65 |
| V.1.1. <i>Matéria-Prima</i> | 65 |
| V.1.2. <i>Mercado Interno</i> | 67 |
| V.1.3. <i>Porto de Exportação</i> | 67 |
| V.1.4. <i>Características Relevantes do Processo</i> | 69 |
| V.1.5. <i>Localização</i> | 69 |
| V.2. <i>Modelo de Negócios</i> | 70 |
| V.2.1. <i>Proposta de Valor</i> | 70 |
| V.2.2. <i>Parcerias Chave</i> | 71 |
| V.2.3. <i>Atividades Chave</i> | 71 |
| V.2.4. <i>Recursos Chave</i> | 71 |
| V.2.5. <i>Relacionamento com Clientes e Canais</i> | 72 |
| V.2.6. <i>Segmento de Clientes</i> | 72 |
| V.2.7. <i>Estrutura de Custos</i> | 72 |
| V.2.8. <i>Fontes de Receita</i> | 73 |
| V.2.9. <i>Quadro de Modelo de Negócios Canvas</i> | 73 |
| V.3. <i>Escala de Produção</i> | 74 |
| VI. AVALIAÇÃO ECONÔMICA | 75 |
| VI.1. <i>Premissas</i> | 75 |
| VI.2. <i>Investimento Fixo</i> | 76 |
| VI.3. <i>Estrutura de Custos</i> | 81 |
| VI.3.1. <i>Matérias-Primas</i> | 82 |

| | |
|--|------------|
| <i>VI.3.2. Custos Variáveis</i> | 83 |
| <i>VI.3.3. Custos Fixos</i> | 84 |
| <i>VI.4. Receitas</i> | 88 |
| <i>VI.5. DRE e Fluxos de Caixa</i> | 88 |
| <i>VI.6. Fluxos de Caixa com Compensação de Perda de Receita</i> | 94 |
| <i>VI.7. Análises de Sensibilidade</i> | 98 |
| <i>VI.7.1. Taxa Mínima de Atratividade</i> | 98 |
| <i>VI.7.2. Investimento por Tonelada</i> | 99 |
| <i>VI.7.3. Preço de Venda</i> | 101 |
| <i>VI.7.3. Taxa de Ocupação Inicial</i> | 103 |
| <i>VI.7.3. Fator de Localização</i> | 105 |
| | |
| VII. DISCUSSÕES | 107 |
| | |
| VIII. CONCLUSÃO | 110 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |

I. INTRODUÇÃO

A demanda global de plásticos cresce anualmente. Somente entre 2017 e 2018, a produção global cresceu de 348 para 359 milhões de toneladas (PLASTICS EUROPE, 2019), das quais mais de 99% são de origem fóssil e não biodegradáveis (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2019). No Brasil, foram consumidos aproximadamente 6,6 milhões de toneladas de materiais plásticos em 2018, dos quais 50,9% têm tempo de vida, ou seja, o período entre a fabricação e o descarte, igual ou menor a 5 anos (ABIPLAST, 2019).

A problemática dos plásticos está relacionada não só ao crescente uso de recursos não renováveis e à pegada de carbono gerada, mas principalmente às dificuldades no controle de descarte, culminando em destinação final inadequada de grande quantidade de itens plásticos, especialmente em corpos d'água como rios e oceanos (OSTLE, THOMPSON, *et al.*, 2019). O descarte inadequado e o acúmulo de plástico no meio ambiente constituem uma séria ameaça à biodiversidade marinha (DARMON, MIAUD, *et al.*, 2017, DEUDERO, ALOMAR, 2015) e podem gerar impactos sociais e econômicos a comunidades costeiras (BROUWER, HADZHIYSKA, *et al.*, 2017). Projeções indicam que no ano de 2050, a massa de material plástico nos oceanos será maior que a massa de peixes (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016). Outra grande questão ligada ao descarte inadequado de materiais plásticos é a formação de microplásticos, pelo potencial danoso dessas partículas à saúde humana e ao meio ambiente, mesmo ainda pouco se sabendo sobre esses possíveis efeitos (UNEP, 2016).

Visto isso, em conjunto ao aumento da conscientização ambiental na sociedade, e, conseqüentemente, em empresas e governos, criam-se nesse cenário oportunidades de desenvolvimento para soluções à problemática dos plásticos, incluindo diversas tecnologias como a redução do uso, a reciclagem e os bioplásticos.

Os bioplásticos podem ser definidos como materiais plásticos de origem renovável ou biodegradáveis ou ambas as características (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018a), como ilustrado na Figura 1, e representam, atualmente, menos de 1% de toda a produção de materiais plásticos no mundo, com produção em 2019 pouco maior que 2,1 milhões de toneladas (EUROPEAN

BIOPLASTICS, 2019). Dentre os principais bioplásticos produzidos atualmente, destacam-se o PE e o PET de origem renovável, e o PBAT e PLA biodegradáveis.

Formado a partir da polimerização direta do ácido láctico ou do lactídeo, o PLA é um termoplástico que apresenta diversas propriedades comparáveis às dos plásticos de origem fóssil e que possui potencial de aplicação em diversas áreas. Um dos principais diferenciais deste polímero, no entanto, consiste na sua capacidade de ser biodegradado em condições de compostagem industrial (WEE, KIM, *et al.*, 2006).

Apesar de ter sido apresentado como uma alternativa sustentável aos plásticos tradicionais, diversos fatores dificultaram a adoção do PLA em grande escala. Baixa resistência térmica, lenta taxa de cristalização e baixa resistência ao impacto são algumas das características que restringem as aplicações desse polímero (NAGARAJAN, MOHANTY, *et al.*, 2016). A alta biocompatibilidade, no entanto, atraiu grande interesse da área médica, tornando o PLA um dos polímeros com maior proeminência no setor (JAHNO, 2005).

Ao longo dos últimos anos, diversos esforços tecnológicos foram realizados para melhorar as propriedades do PLA e, assim, expandir suas aplicações. A copolimerização e a incorporação de aditivos são algumas das inovações que elevaram a performance do polímero, permitindo maior competitividade com os plásticos commodities. (BLEDZKI, JASZKIEWICZ, 2010, HARRIS, LEE, 2007, NANDA, MISRA, *et al.*, 2011).

Em 2019, a produção mundial anual de PLA chegou a mais de 290 mil toneladas, ou aproximadamente 13,9% do total de bioplásticos produzidos (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2019). Todavia, não há produção local do polímero e este ainda é muito pouco utilizado no Brasil. De 2010 e 2019, a importação média brasileira de PLA foi de apenas pouco mais de 78 toneladas, com preço médio próximo a U\$4750/ton (MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL, 2021).

No entanto, é relevante a experiência brasileira com rotas fermentativas, inclusive do ácido láctico, principal etapa na obtenção de PLA e que é produzido localmente pela Corbion PURAC em Campos dos Goytacazes, no estado do Rio de Janeiro. Esse conhecimento adquirido, aliado à importância dos mercados de nicho para plásticos considerados sustentáveis, bem como à disponibilidade de acesso a matérias-primas, poderiam se mostrar grandes vantagens para a

produção do PLA nacionalmente? Pode-se considerar que a produção do PLA no Brasil poderia ser vista como uma possibilidade de agregação de valor à cadeia do açúcar e etanol no Brasil?

É possível encontrar também no Brasil experiências na produção de bioplásticos como o PE de origem renovável da Braskem, um bioplástico drop-in, ou seja, substituto perfeito do PE produzido a partir de matéria-prima fóssil, que tem relevância em escala local e global, ou as embalagens e descartáveis biodegradáveis produzidos no Rio de Janeiro a partir da fécula de mandioca pela CBPak Tecnologia (BRASKEM, 2021, SOUZA, 2016).

Os desafios propostos são evidentes, principalmente vista a baixa demanda atual e a base tecnológica ainda não completamente madura para produção do PLA. Entretanto, considerando a crescente demanda por soluções ao plástico, a experiência local, não só com rotas fermentativas, mas também na produção de ácido lático e de outros bioplásticos, além do abundante acesso à matéria-prima, seria o Brasil um local promissor para a produção do PLA?

Neste trabalho, então, objetiva-se avaliar a viabilidade técnico-econômica de produção de PLA no Brasil. A matéria-prima escolhida foi o melaço de cana-de-açúcar, pela grande potencialidade do uso em processos fermentativos, bem como pela possibilidade de agregação de valor à cadeia produtiva do açúcar a partir da utilização de um subproduto de menor valor agregado. O uso do melaço ainda representa alternativa tecnológica mais madura quando comparada a outras opções de segunda geração, além de apresentar vantagens ambientais comparativamente a processos que utilizam matéria-prima fóssil, com potencialidade de agregação de valor para mercados de nicho, importantes no presente cenário mercadológico desses materiais.

A possibilidade do uso de melaço como matéria-prima foi pensada como um processo integrado a uma indústria local já estabelecida, em direção a um modelo de biorrefinaria¹. Dessa forma, agregando complexidade e valor à produção de açúcar local a partir da transformação de um subproduto dessa indústria. O processo foi, portanto, idealizado como parte adicional da cadeia de produção de açúcar e realizada em parceria com esses produtores.

¹ Biorrefinarias são plantas química industriais produtoras de uma ampla gama de produtos (combustíveis, solventes, plásticos, alimentos, entre outros) a partir de biomassa (milho, cana-de-açúcar, ...) ou resíduos (de papel, madeira, animal, alimentícios, ...) (OHARA, 2003)

Visto isso, essa pesquisa tem por objetivo principal avaliar as condições de viabilidade técnicas e econômica da instalação e operação de uma planta industrial para produção de poli(ácido láctico) no Brasil a partir do melaço de cana-de-açúcar de forma integrada à produção de açúcar, a fim de entender a situação brasileira atual, bem como as potencialidades deste cenário, na tentativa de compreender de forma ampla as particularidades locais deste tipo de projeto. A partir disso, surgem outros objetivos específicos:

- Definição da escala e da rota tecnológica que fazem sentido no caso brasileiro;
- A escolha da localização ideal para o projeto;
- A estimativa do potencial mercado local para o PLA;
- A determinação do grau de integração da planta em função dos aspectos logístico e econômico,
- A identificação dos fatores que contribuem de forma mais intensa para a viabilidade do projeto.

A metodologia aplicada foi a de um estudo de viabilidade técnica e econômica, baseando na compreensão da tecnologia disponível para produção nas condições desejadas e na projeção de fluxos de caixa para o empreendimento proposto. Dessa forma, permitindo a projeção de retornos esperados para a planta desenvolvida. Vale ressaltar que o presente estudo não compreende a análise de financiamento da planta, ou seja, considerou-se que todo o investimento teve origem em capital próprio.

Esse trabalho é estruturado da seguinte forma: neste Capítulo I está contida a introdução do projeto, bem como a disposição de objetivos principais e específicos; o Capítulo II descreve toda metodologia adotada, da análise bibliográfica aos tópicos relevantes à avaliação de viabilidade técnica e econômica; o Capítulo III contém os resultados da análise bibliográfica acerca de toda a temática relevante, discorrendo sobre a temática dos bioplásticos, o histórico, as possíveis rotas de produção e características físico-químicas do PLA, além da descrição de rota escolhida e respectivas justificativas; no Capítulo IV foi avaliada a situação atual do mercado nacional e internacional do PLA; no Capítulo V é estruturado o modelo de negócio escolhido, apresentando e justificando escolhas relevantes ao estudo, como nível de integração, localização e escala; o Capítulo VI contém a avaliação econômica do projeto, com avaliação

de fluxos de caixa projetados, taxa de retorno interna e valor presente líquido do projeto, bem como análises de sensibilidade e premissas adotadas na análise; o Capítulo VII apresenta a discussão dos resultados obtidos; o Capítulo VIII descreve as conclusões do estudo; e, por fim, as referências bibliográficas do trabalho.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

II.1. Análise Bibliográfica Exploratória

O projeto inicia-se com a realização de uma análise bibliográfica de forma exploratória, a fim de mapear todos os aspectos relevantes à avaliação econômica, bem como compreender a dinâmica de produção e mercado do poliácido láctico tanto no Brasil quanto no resto do mundo.

As fontes analisadas foram artigos científicos com temática correlata ao presente projeto, *websites* e *press releases* de empresas inseridas no mercado do PLA, documentos de instituições ligadas ao mercado de bioplásticos (European Bioplastics, Plastics Europe, entre outros), além de qualquer outra fonte relevante ao tema proposto. As principais fontes utilizadas foram o Portal Capes e as bases Science Direct e Google Scholar, além de busca no Google por empresas produtoras e notícias relevantes.

Os resultados dessa análise exploratória estão dispostos na seção III, Revisão Bibliográfica, contendo: uma visão geral do que são os bioplásticos (III.1), um breve histórico de desenvolvimento do PLA (III.2), descrição do processo de síntese do PLA (III.3), suas características físico-químicas (III.4), além da descrição do processo de produção industrial escolhido como base para a análise proposta (III.5).

II.2. Projeção de Demanda Brasileira

A projeção da demanda interna é relevante, em primeiro lugar, para avaliar a viabilidade de venda em território nacional, bem como compreender a possibilidade de exportação de parte da produção. Assim, contribuindo com

importante seção da análise de viabilidade econômica desenvolvida posteriormente.

A projeção de demanda também é parte crucial da compreensão do mercado consumidor, essencial para o estudo de localização.

A demanda nacional foi estabelecida a partir da possibilidade de substituição de produtos existentes no mercado, em especial para embalagens descartáveis. Apesar de apresentar maior valor agregado que outros plásticos usados para essa finalidade, e, conseqüentemente, costuma ser inserido apenas em certos nichos do mercado de embalagens, para fins de simplificação, será considerado que o PLA compete pelo mesmo mercado que os plásticos convencionais, como PET, PP ou até mesmo PE em alguns casos.

Para o estudo de localização, o mercado interno será considerado, portanto, proporcionalmente distribuído entre as unidades da federação de acordo com o consumo de plástico para embalagens.

II.3. Estudo de Localização

Uma importante etapa de qualquer projeto é o estudo e a definição de localização da planta, impactando fortemente em toda a logística de produção e distribuição, bem como em custos relacionados a esses desafios.

Essa é uma etapa complexa, que será abordada de forma simplificada e essencialmente qualitativa nesse trabalho, buscando compreender quais principais fatores devem ser considerados na escolha de localização dessa planta de PLA, bem como o que esses representam para o projeto proposto.

A definição de localização da planta também tem como principal consequência a definição de custos relativos ao transporte de matérias-primas, de fretagem do produto final, de estoque e de armazenamento, importantíssimos para qualquer projeto comercial.

II.3.1. Principais Custos Logísticos

Em primeiro lugar, precisa-se compreender quais custos têm mais relevância na composição do custo total com logística. Esses custos têm,

consequentemente, maior impacto na decisão de localização da planta, visando reduzir custos e reforçar a viabilidade do projeto.

Segundo o Instituto de Logística e Supply Chain (ILOS) (2021), em média, os custos logísticos representaram 7,6% da receita líquida das empresas brasileiras em 2017. Desse percentual, os principais componentes são transporte, estoque e armazenagem, com transporte representando a maior fração.

II.3.2. Principais Parâmetros para o Estudo de Localização

Como a definição de localização de uma planta tem principal objetivo a redução dos custos logísticos, em especial de transporte, tanto de matéria-prima quanto do produto final, e, como apontado por (BALLOU, 2007), existe uma natureza decrescente dos custos de transporte com a distância, a localização de uma instalação é forçada para próximo ao fornecedor ou próximo ao mercado consumidor.

Assim, o primeiro passo da análise desenvolvida é compreender geograficamente os possíveis agentes fornecedores de cana-de-açúcar e onde estão localizados os mercados consumidores de PLA. No caso dos mercados consumidores, é necessário, além da localização de mercados locais, incluir os possíveis portos de exportação, englobando o acesso ao mercado externo.

Ademais, é preciso analisar quais fatores contribuem para deslocar a localização ótima para uma proximidade maior com fornecedores ou consumidores. O principal fator analisado foi a relação mássica entre matéria-prima e o produto acabado, descrito nas seguintes categorias por (BALLOU, 2007):

- 1. Perda de massa no processo:** a massa de matéria-prima é maior que a massa de produto acabado que sai para o mercado consumidor. Em geral ocorre pela geração de subprodutos inutilizáveis. Nesses casos, a instalação deve ser próxima aos centros fornecedores de matéria-prima, a fim de minimizar custos de transporte.
- 2. Ganho de massa no processo:** a massa de matéria-prima fretada é menor que a massa de produto acabado. Em geral ocorre pelo uso

de outras matérias-primas como água e ar no produto acabado. Nesses casos, a localização ideal é próxima ao mercado consumidor.

- 3. Não há diferença significativa:** massas de matérias-primas e produto acabado são aproximadamente iguais. Isso ocorre, por exemplo, no caso de montadoras, onde o produto final é apenas a soma das partes usadas como matéria-prima. Nesse caso, não há preferência óbvia pela localização próxima ao mercado consumidor ou aos fornecedores.

Outro ponto relevante além da massa é a densidade de matérias-primas e produto acabado. Assim como grandes diferenças mássicas, disparidades volumétricas podem afetar os custos de transporte e devem, portanto, ser analisadas na mesma lógica.

Para a análise do caso específico é necessário, por fim, compreender como a dinâmica do processo de produção de PLA a partir do bagaço se enquadra nessas categorias listadas, possibilitando direcionar a escolha de localização a partir dos fornecedores ou do mercado consumidor.

II.4. Modelo de Negócios

Segundo (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010), o modelo de negócios descreve a forma como uma empresa cria, entrega e captura valor. O modelo de negócios do projeto proposto será demonstrado com a utilização do modelo Canvas, como desenvolvido por Alexander Osterwalder. Cada um dos tópicos será descrito separadamente e, ao fim, apresentar-se-á um quadro como resumo do modelo de negócios. Os nove elementos componentes do modelo de negócios Canvas são:

- **Proposta de Valor:** Segundo (OSTERWALDER, 2004), a proposição de valor do negócio constitui-se dos benefícios entregues pela firma para um determinado segmento de clientes. É definida não só como o produto ou serviço comercializado, mas também todo adicional de valor oferecido para suprir os desejos e necessidades do consumidor. O elemento Proposta de Valor fornece uma visão geral dos produtos e serviços oferecidos pela empresa que representam valor para um segmento consumidor específico. É necessário

compreender qual o valor entregue ao consumidor, quais problemas do consumidor o produto ou serviço soluciona, quais necessidades do consumidor são contempladas e quais produtos ou serviços são entregues para cada Segmento de Clientes (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010).

A proposta de valor pode incluir pontos como: inovação, performance, *design*, *status*, preço, redução de custos, redução de riscos, conveniência, ou qualquer outro tipo de valor percebido pelo consumidor e capaz de ser capturado pela empresa.

• **Parcerias Chave:** Parcerias são definidas como a formação de acordos de cooperação voluntários entre empresas independentes a fim de realizar um projeto ou uma atividade específica. As Parcerias Chave são aquelas que compõem a rede de fornecedores e parceiros necessários para operacionalizar o modelo de negócios proposto. Parcerias-Chave também podem ser essenciais para otimizar o modelo de negócio e reduzir riscos. Distingue-se alguns tipos de parcerias (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Alianças estratégicas entre não competidores;
- Parcerias estratégicas entre competidores;
- *Joint ventures*;
- Relações ente comprador e fornecedor para garantir o suprimento de recursos essenciais ou matérias-primas.

Existem ainda três principais motivadores de formação de parcerias (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Otimização e economia de escala;
- Redução de riscos e incertezas;
- Aquisição de recursos.

• **Atividades Chave:** descreve as ações ou atividades mais importantes que devem ser desempenhadas pela empresa para fazer o modelo de negócios funcionar, ou seja, necessárias para criar e entregar a Proposta de Valor, alcançar mercados, manter Relacionamento com Clientes e gerar receitas. As Atividades Chave podem ser caracterizadas como (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Produção: relacionadas ao *design*, fabricação e entrega da Proposta de Valor;

- Resolução de Problemas: importantes para o desenvolvimento de soluções para problemas individuais dos clientes;
- Plataforma: necessárias para o desenvolvimento de plataformas ou sistemas sobre as quais é desenvolvido o modelo de negócios.

• **Recursos Chave:** descreve os principais recursos necessários para fazer o modelo de negócios funcionar, ou seja, criar e entregar a Proposta de Valor, alcançar mercados, manter Relacionamento com Clientes e gerar receita. Esses recursos podem ser físicos, financeiros, intelectuais ou humanos, e podem ser comprados ou licenciados pela própria empresa ou pelos Parceiros-Chave. Nesse elemento, é necessário compreender quais recursos são necessários para criar a Proposta de Valor, quais são necessários para manter os canais de distribuição e o Relacionamento com Clientes e quais são necessários para manter as Fontes de Receita (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010).

• **Relacionamento com Clientes:** descreve os tipos de relacionamentos que a empresa estabelece com os clientes. Em especial descrever se a estratégia de comunicação será focada em adquirir consumidores, reter ou manter consumidores ou aumento de vendas (*upselling*). É necessário definir qual tipo de relacionamento a empresa terá com cada Segmento de Clientes, qual tipo de relacionamento os clientes esperam da empresa, qual o custo dessa escolha e como essa escolha se relaciona com o restante do modelo de negócios. Todas essas escolhas influenciam a experiência do cliente com a empresa (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010).

• **Canais:** é descrito como a forma ou os meios que a firma se comunica e entrega a Proposta de Valor para os Segmentos de Clientes. As funções desempenhadas pelos canais são (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Gerar visibilidade para os produtos e serviços oferecidos;
- Ajudar clientes a avaliar a Proposta de Valor da empresa;
- Criar acesso aos produtos e serviços oferecidos;
- Entregar a Proposta de Valor aos clientes;
- Atendimento pós-venda aos clientes.

O principal ponto relevante para a presente análise são os canais de entrega, visto que os demais pontos são menos concretos.

• **Segmento de Clientes:** O elemento Segmento de Clientes contém todos os tipos de clientes, mercados, grupos ou organizações que uma empresa deseja alcançar e servir. Uma empresa pode servir a um ou mais segmentos de clientes, que devem ser tratados como grupos distintos se (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- As necessidades dos segmentos requerem ou justificam uma oferta distinta;
- Os segmentos são alcançados a partir de canais diferentes;
- Os segmentos requerem tipos diferentes de relacionamentos com a empresa;
- Os segmentos apresentam lucratividade significativamente diferente para a empresa;
- Os segmentos estão interessados em diferentes aspectos da oferta.

É necessário compreender para quem o valor está sendo criado e quem são os consumidores mais importantes do negócio (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010).

• **Estrutura de Custos:** O elemento de Estrutura de Custos representa todos os custos monetários da empresa, a fim de produzir, criar, divulgar ou entregar valor ao Segmento de Clientes e manter o modelo de negócios. Em geral, são facilmente descritos a partir da definição das Parcerias Chave, Atividades Chave e Recursos Chave. Os custos são divididos a partir das seguintes características (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Custos Fixos: independentes do volume de serviços ou produtos criados – exemplo: salários;
- Custos Variáveis: proporcionais ao volume de serviços ou produtos criados – exemplo: matéria-prima;
- Economia de Escala: vantagens no custo obtidas com o aumento do volume de serviços ou produtos criados – exemplo: redução no custo por unidade com o aumento da escala;

- Economia de Escopo: vantagens no custo obtidas por uma operação com maior escopo – exemplo: distribuição de mais de um produto a partir de um mesmo canal.

• **Fontes de Receita:** As Fontes de Receita são elementos que descrevem a entrada de dinheiro na firma a partir da Proposta de Valor para cada Segmento de Clientes. Um modelo de negócios pode envolver dois tipos diferentes de Fontes de receita (OSTERWALDER, 2004, OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010):

- Receita proveniente de clientes que fazem compras únicas;
- Receitas recorrentes provenientes da entrega da Proposta de Valor ou por assistência ao consumidor pós-venda.

É necessário compreender ainda: qual valor e como cada segmento de consumidor está disposto a pagar e o quanto cada Fonte de Receita contribui para o total (OSTERWALDER, PIGNEUR, 2010).

II.5. Estudo de Viabilidade Econômica

Um estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) consiste em uma análise preliminar acerca dos aspectos tecnológicos e econômicos envolvidos em um projeto que visa à produção de um novo produto. A principal funcionalidade desse tipo de relatório é fornecer informações técnicas sobre o processo, bem como indicar se há ou não atratividade econômica no projeto (TOWLER, SINNOTT, 2013).

O EVTE desenvolvido neste trabalho segue algumas diretrizes básicas encontrados nesse tipo de estudo, a saber:

- Descrição da tecnologia: Explorar a tecnologia escolhida, descrevendo as reações químicas envolvidas, os reagentes e catalisadores necessários, os subprodutos gerados etc. Detalhar o processo industrial, especificando as condições operacionais.
- Análise comercial: Indicar as principais aplicações do produto; analisar as condições atuais de mercado; explorar as melhores localizações para a planta do projeto.
- Análise econômica: Apresentar estimativas para o investimento do projeto e os custos de produção; determinar a viabilidade econômica do projeto; realizar análise de sensibilidade, discutindo quais variáveis possuem

maior influência sobre os resultados. Neste estudo, esta etapa será realizada por meio da análise dos fluxos de caixa do projeto e da Demonstração do Resultado de Exercício (DRE)

II.5.1. Fluxos de Caixa

Os fluxos de caixa de um projeto são parte integral do EVTE e apresentam todas as entradas e saídas de dinheiro em um certo intervalo de tempo. Para um dado período, o fluxo de caixa líquido é calculado subtraindo-se entradas e saídas (TOWLER, SINNOTT, 2013). A composição dos fluxos de caixa do presente estudo é a seguinte:

- Entradas: receitas operacionais líquidas, capital de giro recuperado
- Saídas: investimento total (fixo e capital de giro); custos de produção (variável e fixo); despesas operacionais e impostos

II.5.2. Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) refere-se à técnica de correção de valores da série de fluxos de caixa de um projeto para o presente, baseando-se na chamada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que representa o retorno mínimo esperado para um dado investimento. Dessa maneira, o VPL é calculado pelo seguinte equacionamento:

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j},$$

onde FC_j é o valor do fluxo de caixa para o ano j e n é o número total de anos de operação.

Para indicar que um projeto é economicamente viável, o VPL precisa ser maior ou igual a zero, indicando que o retorno esperado foi atingido, no caso de um VPL igual a zero, ou ultrapassado, para qualquer valor positivo.

Também é possível calcular o payback do projeto, isto é, o tempo em que ocorre retorno do investimento realizado. Em termos de cálculo, esse momento é alcançado quando o VPL assume seu primeiro valor não negativo.

É importante indicar que o VPL não é a única ferramenta utilizada na avaliação técnica e econômica de um projeto, e que deve ser avaliada em conjunto com outras possíveis análises tecnológicas, de localização, demanda, entre outros.

II.5.2.1 Investimento total

O investimento total é subdividido em dois tipos de custos distintos: investimento fixo e capital de giro. O primeiro é definido como os custos totais envolvidos na projeção, construção e instalação de uma determinada planta industrial.

A estimativa do investimento fixo pode ser feita de diferentes formas, a depender da disponibilidade dos dados. Como descrito na análise por (TRIBE, ALPINE, 1986), a denominada 'regra do 0,6' pode ser aplicada para estimar de maneira generalizada a alteração de investimentos relativos a alterações de escalas em plantas industriais, em especial para equipamentos como tanques e tubulações. Dessa maneira, utiliza-se a expressão:

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\alpha$$

onde C é o investimento fixo, V é a capacidade produtiva da planta e α é igual a 0,6.

De maneira geral, a regra pode ser utilizada para obter-se o investimento fixo de uma planta com capacidade V_2 a partir de uma dada planta com capacidade V_1 e custo C_1 .

Para atualização temporal de valores de custo, por falta de acesso a informações correspondentes a países além dos Estados Unidos, utilizar-se-ão os dados disponibilizados pela consultoria INTRATEC (2021) para esse país. Os índices para os Estados Unidos entre 2018 e janeiro de 2021 são como descritos da Tabela 1. Como descrito pela Intratec, a atualização de custos no tempo é feita pela multiplicação do investimento fixo pela razão entre o índice do período original e o índice atual.

Tabela 1 – Índices de Custo para Plantas adaptado de INTRATEC (2021).

| Data | Índice de Custo para os Estados Unidos |
|-------------|---|
| Jan 2018 | 148,0 |
| Fev 2018 | 149,3 |
| Mar 2018 | 150,8 |
| Abr 2018 | 152,6 |
| Mai 2018 | 155,2 |
| Jun 2018 | 156,5 |
| Jul 2018 | 158,5 |
| Ago 2018 | 159,3 |
| Set 2018 | 160,2 |
| Out 2018 | 160,1 |
| Nov 2018 | 158,3 |
| Dez 2018 | 158,6 |
| Jan 2019 | 158,5 |
| Fev 2019 | 158,3 |
| Mar 2019 | 158,5 |
| Abr 2019 | 159,1 |
| Mai 2019 | 158,3 |
| Jun 2019 | 157,4 |
| Jul 2019 | 156,0 |
| Ago 2019 | 155,4 |
| Set 2019 | 155,6 |
| Out 2019 | 153,4 |
| Nov 2019 | 152,8 |
| Dez 2019 | 152,5 |
| Jan 2020 | 151,9 |
| Fev 2020 | 151,8 |
| Mar 2020 | 150,8 |
| Abr 2020 | 148,9 |
| Mai 2020 | 149,2 |
| Jun 2020 | 149,7 |
| Jul 2020 | 150,1 |

| | |
|----------|--------|
| Ago 2020 | 150,0 |
| Set 2020 | 149,8* |
| Out 2020 | 150,7* |
| Nov 2020 | 151,8* |
| Dez 2020 | 153,2* |
| Jan 2021 | 160,7* |

* Valores preliminares.

Os valores típicos de proporcionalidade dos itens componentes diretos e indiretos do investimento fixo estão foram descritos por Peters e Timmerhaus (1991) e estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Porcentagens típicas do investimento fixo para custos diretos e indiretos (PETERS, TIMMERHAUS, 1991).

| Item | Faixa Percentual (%) |
|---------------------------|----------------------|
| Custos Diretos | |
| Compra de Equipamentos | 15-40 |
| Instalação | 6-14 |
| Instrumentação e Controle | 2-8 |
| Tubulações | 3-20 |
| Elétrica | 2-10 |
| Construções | 3-18 |
| Área Externa | 2-5 |
| Instalações de Serviço | 8-20 |
| Terreno | 1-2 |
| Custos Indiretos | |
| Engenharia e Supervisão | 4-21 |
| Despesas de Construção | 4-16 |
| Construtora | 2-6 |
| Contingência | 5-15 |

Outra forma empírica relevante de estimação do investimento fixo é por meio da definição de ISBL², ou todos os custos de equipamentos diretamente relacionados à planta de produção, e OSBL³, ou todos os custos periféricos à planta de produção, como utilidades e escritórios. Essas relações são como descritas por (TOWLER, SINNOTT, 2013), e estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Relações empíricas dos componentes do investimento fixo como descritas por (TOWLER, SINNOTT, 2013).

| Item | Relação |
|--------------------------|----------------------------|
| Investimento Fixo | $IF = I1 + I2 + I3 + I4$ |
| ISBL | $I1$ |
| OSBL | $I2 = 0,4 \cdot I1$ |
| Custos de Engenharia | $I3 = 0,2 \cdot (I1 + I2)$ |
| Encargos de Contingência | $I4 = 0,1 \cdot (I1 + I2)$ |

O outro componente do investimento total, o capital de giro, consiste no capital necessário para dar a partida na planta e mantê-la funcionando. Enquanto houver operação, o capital de giro é necessário, sendo recuperado no fim da vida útil do projeto. Isto é, esse custo em particular aparece como uma saída no primeiro fluxo de caixa e reaparece como uma entrada no último (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Segundo (TOWLER, SINNOTT, 2013), o capital de giro pode representar desde 5% do valor do investimento fixo, para projetos simples, até 30%, para projetos de maior complexidade.

II.5.2.2 Custo de produção

² ISBL ou Inside Battery Limits representa todos os custos de obtenção e instalação de todos os equipamentos que compõem a planta de produção em si, como todos os equipamentos necessários para produção, tubulações, instrumentação, entre outros (TOWLER, SINNOTT, 2013).

³ OSBL ou Outside Battery Limits representa os custos de adições necessárias à infraestrutura para o projeto, como para geração e transmissão de eletricidade, tratamento de efluentes, laboratórios, escritórios, entre outros (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Os custos de produção correspondem aos gastos envolvidos no processo de obtenção do produto final. Dependendo da natureza do gasto, os custos são divididos em variáveis e fixos.

A) Custos variáveis

São aqueles que variam proporcionalmente com a escala de produção empregada. Nesse sentido, os custos associados à aquisição das matérias-primas utilizadas nessa categoria. Para a contabilização desses valores, é necessário conhecer os coeficientes técnicos do processo, isto é, a relação numérica entre as quantidades de insumos consumidos e de produtos gerados, bem como o preço de comercialização de cada matéria-prima (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Ainda estão incluídos nessa categoria os custos com as ditas utilidades, que não são parte integral do processo, mas necessárias para a produção. Em uma indústria química, as utilidades geralmente consistem em fontes de energia, fluidos para aquecimento/resfriamento, correntes de ar e água etc. Segundo Peters e Timmerhaus (1991), uma boa estimativa inicial para esses custos está em torno de 15% do custo total de produção.

B) Custos fixos

São aqueles que não são alterados conforme a quantidade de produtos produzida pela planta. Estão incluídos nessa categoria: os custos envolvidos na mão-de-obra; a manutenção da planta e do patrimônio material; seguros; despesas operacionais, dentre outros custos gerais (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Os custos de mão-de-obra abrangem os salários e benefícios pagos aos colaboradores que atuam na planta. Os funcionários podem ser separados entre os operadores, que trabalham em turnos diretamente no processo, e supervisores/administradores, que trabalham em horário comercial (TOWLER, SINNOTT, 2013).

A manutenção consiste no custo necessário para manter a planta em boas condições de funcionamento e inclui os gastos com a substituição de peças ou

equipamentos e com a mão-de-obra especializada para reparos (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Os custos com seguro em uma indústria química pretendem cobrir os possíveis danos causados às instalações da planta em decorrência do processo. Como a determinação desse valor é difícil, Towler e Sinnott (2013) sugerem uma estimativa inicial de 1% do investimento fixo.

As despesas operacionais podem ser divididas em três categorias de custos associados ao projeto: Pesquisa e desenvolvimento (P&D), marketing e vendas, e despesas administrativas (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Os gastos com P&D englobam todo o processo de desenvolvimento de novas tecnologias e produtos dentro de uma indústria. Dependendo do tipo de atividade praticada pela empresa, o valor dessas despesas pode variar significativamente. Segundo Towler e Sinnott (2013), os gastos em questão estão em uma faixa entre 1% da receita, para as empresas petroquímicas, e 15%, para as farmacêuticas.

Os custos com marketing e vendas correspondem às despesas envolvidas com a captação de novos clientes, divulgação do produto e pesquisas de mercado. A parcela competente a esse gasto é geralmente negligente para produtores com pouca diversificação, tais como os de commodities, mas pode representar até 5% do custo total de produção no caso de produtos de alta sofisticação (TOWLER, SINNOTT, 2013).

As despesas administrativas compreendem todos os custos dos setores de administração do projeto: gerência geral, recursos humanos, setores financeiro e jurídico, compras etc. Como estimativa inicial para essas despesas, será adotado um valor de referência correspondente a 65% dos custos com a mão-de-obra, como proposto por Towler e Sinnott (2013).

II.5.2.4 Receitas Operacionais

As receitas previstas no projeto são obtidas, em totalidade, a partir das vendas do produto. Para efeitos de cálculo, faz-se a multiplicação da quantidade produzida pelo preço unitário de venda.

II.5.2.3 Imposto de Renda

As empresas brasileiras seguem regras de tributação estabelecidas pela Receita Federal por meio do Imposto sobre Pessoas Jurídicas (IPRJ), cuja alíquota consiste em 15% sobre o lucro apurado da empresa. Após este desconto inicial, as empresas que apresentarem lucro superior a R\$ 20.000,00 deverão pagar uma alíquota adicional de 10%. Ademais, também haverá tributação de 9% do lucro líquido para fins de contribuição social (CSLL). Desse modo, a alíquota total a ser deduzida é de 34%.

O imposto de renda é descontado após a contabilização das despesas da empresa e da denominada depreciação. Este encargo tem natureza não-monetária, isto é, não aparece nos fluxos de caixa como uma das saídas, embora atue reduzindo a receita da empresa no âmbito fiscal. A depreciação é calculada com base no investimento fixo, podendo ser entendida como a desvalorização (física, tecnológica etc.) dos ativos de uma empresa. Na prática, por se tratar de é um encargo não pagável, a depreciação atua como um abono dado pelo governo para que as empresas possam repor ou substituir os equipamentos desgastados ou obsoletos.

O método mais simples para o cálculo da depreciação consiste em assumir uma abordagem linear, com percentual constante do investimento fixo descontado anualmente.

II.5.3. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno de um projeto é definida como a maior Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que não retorna um valor negativo. Ou seja, a TIR representa o valor de TMA para o qual o Valor Presente Líquido (VPL) é zero (TOWLER, SINNOTT, 2013).

Portanto, para calcular a TIR, basta substituir a variável TMA no equacionamento do VPL, igualando-o a zero:

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} = 0,$$

onde FC_j é o valor do fluxo de caixa para o ano j .

A TIR representa a TMA máxima para qual o projeto ainda se mostra economicamente viável pela da análise do VPL. É relevante ressaltar, novamente, que o VPL não é, e não deve ser utilizado como, única ferramenta para a avaliação de viabilidade de um projeto, e que, conseqüentemente, a TIR deve ser observada da mesma maneira.

II.5.4 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada a partir da alteração de parâmetros e valores da avaliação econômica, resultando diretamente em mudanças nas entradas e saídas definidas no fluxo de caixa. Verificando-se o grau de influência e importância de cada parâmetro alterado no resultado de viabilidade econômica obtida. Dessa forma, é possível compreender quais alterações de premissas e parâmetros da análise oferecem riscos ao projeto, em maior ou menor grau.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

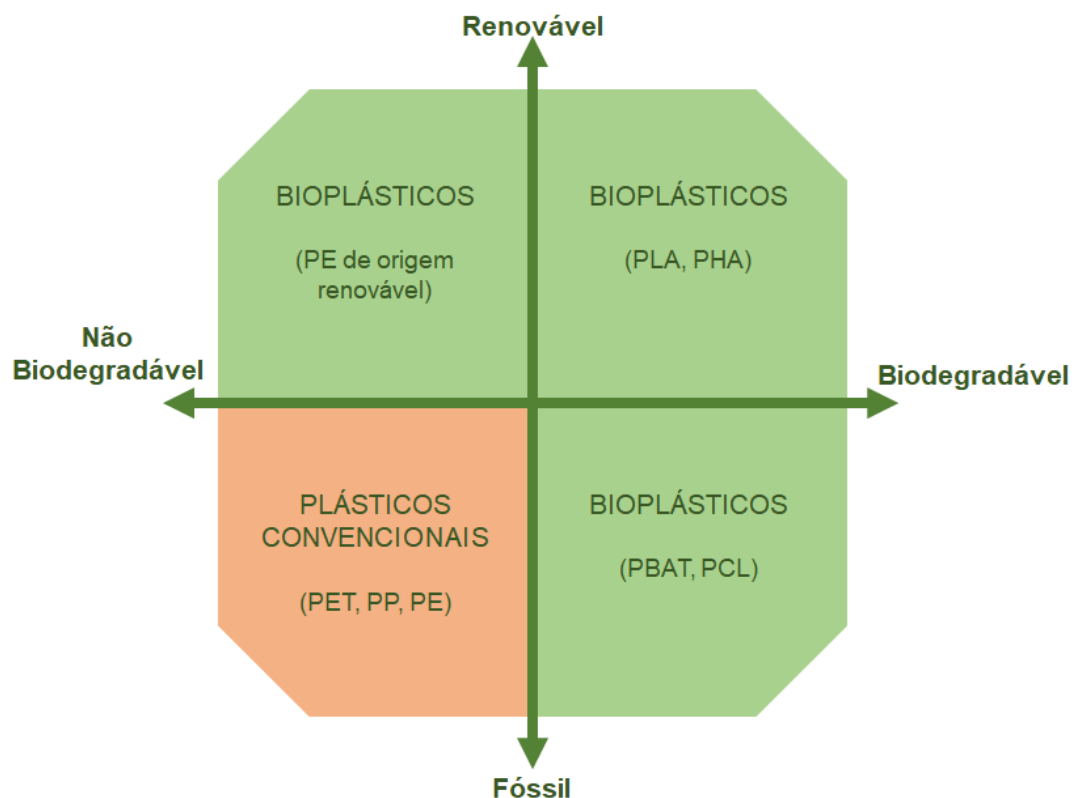
Nesse capítulo, será descrita uma revisão bibliográfica de todos os temas pertinentes às análises desenvolvidas, bem como a descrição do processo produtivo de PLA escolhido para trabalho.

Primeiramente, serão temas fundamentadores da discussão proposta, como a definição e a situação atual dos bioplásticos no mundo, além de histórico, rotas produtivas e características do PLA. Permitindo o desenvolvimento da discussão para a escolha e descrição de uma tecnologia de produção a ser usada em toda a análise de viabilidade econômica.

III.1. Os Bioplásticos

Os bioplásticos são usualmente definidos como plásticos de origem renovável, ou biodegradáveis ou ambas as características (Figura 1) (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018a). Dessa maneira, existem bioplásticos de origem renovável e não biodegradáveis, como o PE verde e o PEF, de origem renovável e biodegradáveis, como o objeto principal aqui em estudo, o PLA, e, ainda, de origem fóssil e biodegradáveis, como o PBAT.

Figura 1 - Visualização gráfica da definição de bioplásticos - adaptado de European Bioplastics (2018a).



Grande parte dos bioplásticos são produzidos a partir de processos fermentativos, com uso de matérias-primas renováveis. Existem, porém, rotas químicas, não só na produção a partir de fontes fósseis, mas também para renováveis, como é o caso do PEF, produzido a partir da polimerização do ácido 2,5-furandicarboxílico e etileno glicol (HWANG, JEON, *et al.*, 2020).

Se por um lado o uso de matérias-primas renováveis pode ser um grande avanço na “desfossilização” da economia, por outro, o consumo de fontes biológicas, em especial variedades alimentícias, como milho, mandioca e até mesmo a cana-de-açúcar, para a produção de químicos acende um relevante debate acerca do impacto da indústria sobre a segurança alimentar de populações, ao consumir parte da oferta de alimentos e pressionar o uso de terras agricultáveis. Em 2018, os bioplásticos foram responsáveis por 0.016% de toda a terra agricultável em uso, mas representam menos de 1% da produção total de plásticos atual (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018a). Ao ganhar mais relevância, é possível que esses materiais representem uma ameaça ao suprimento global de alimentos. Em 2012 foi estimado por Colwill, Wright, *et al.*

que se toda a demanda de plásticos e combustíveis forem supridas por fontes vegetais até 2050, a demanda por terra poderia, nos cenários moderados e pessimistas, ultrapassar a disponibilidade de terra, que precisaria ser suplementada com a ocupação de áreas florestais para agricultura, gerando desmatamento, perda de biodiversidade e agravando a situação climática. Portanto, reforçando a necessidade de utilização de matérias-primas alternativas como resíduos ou subprodutos.

Os bioplásticos têm que superar desafios econômicos e tecnológicos para competir com plásticos convencionais. Alguns, como o PLA, ainda não apresentam a performance necessária para certas aplicações (HAMAD, KASEEM, *et al.*, 2018). Outros, como o PEF, ainda não estão prontos para a produção em grandes escalas, impossibilitando o uso em algumas das principais aplicações (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2018b), como a substituição das embalagens PET.

É relevante, também, reconhecer o papel dos cenários social e político na adoção desses materiais. As políticas públicas têm papel fundamental no desenvolvimento desses materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Essas ações incluem certificação, incentivos ao desenvolvimento de produtos com melhor performance ambiental, regulação do uso de plásticos fósseis convencionais, como a restrição ao uso em algumas aplicações, e incentivos para compras públicas governamentais. Por vez, essas medidas são impulsionadas pela crescente conscientização ambiental presente na sociedade, principalmente em temáticas ligadas às mudanças climáticas e à poluição de corpos d'água por fragmentos plásticos.

Ao tratar-se especificamente do PLA, a diferenciação entre biodegradabilidade e compostabilidade se mostra pertinente. O conceito de compostabilidade é mais restritivo, correspondendo aos materiais com capacidade de degradação por microorganismos em condições de compostagem especificadas (industrial ou não), gerando substâncias húmicas como produto, que podem, por exemplo, ser utilizadas para fins agrícolas. Ou seja, esses materiais não se degradam, necessariamente, em condições ambientes, tendo como garantia de biodegradação apenas em condições de compostagem especificadas. Por outro lado, a biodegradabilidade é um conceito mais geral, representado por materiais com capacidade de degradação a partir

da ação de microorganismos e do ambiente. Essa categoria engloba, portanto, materiais compostáveis, mas não exclusivamente. (EMADIAN, ONAY, *et al.*, 2017, KÖRNER, REDEMANN, *et al.*, 2005)

Outra distinção importante é entre bioplásticos drop-in e não drop-in. Materiais drop-in são aqueles considerados substitutos perfeitos, ou seja, são a mesmas substâncias e apresentam as mesmas propriedades físico-químicas, podendo ser utilizados sem alterações a jusante na cadeia produtiva (OROSKI, Fabio De Almeida, ALVES, *et al.*, 2014). Alternativamente, bioplásticos não drop-in são novos materiais, com diferentes propriedades físico-químicas em comparação aos plásticos convencionais, necessitando, portanto, de alterações significativas na cadeia produtiva como um todo, como é o caso do PLA. Esses novos materiais, em geral, ainda apresentam propriedades técnicas limitadas e podem necessitar de maior desenvolvimento tecnológico (ANDREESSEN, STEINBÜCHEL, 2019, OROSKI, ALVES, *et al.*, 2014).

Materiais não drop-in, como o PLA, apresentam, também, um desafio em processos de reciclagem. A reciclagem mecânica desses materiais não é economicamente viável por ainda não serem produzidos em suficiente volume, e a reciclagem química pode ter custos muito elevados e não está disponível para todos os materiais. Esses bioplásticos ainda podem contaminar as cadeias de reciclagem já estabelecidas, por elas não serem projetadas para a separação desses materiais, principalmente por serem novos e produzidos em baixíssima escala (SOROUDI, JAKUBOWICZ, 2013).

Apesar dos custos mais elevados em comparação à reciclagem mecânica, atualmente, vê-se na reciclagem química uma solução atrativa para o problema da reciclagem de diversos biomateriais. No caso específico do PLA, por exemplo, esse tipo de reciclagem gera diversos produtos com valor agregado – como alquil lactatos, ácido acrílico e ácido lático, que pode ser reformando em PLA. (GERE, CZIGANY, 2020, MCKEOWN, ROMÁN-RAMÍREZ, *et al.*, 2019)

III.2. Histórico da Produção do PLA

As primeiras sínteses do poliácido lático datam de 1932 pelo pesquisador Wallace Carothers, realizadas por meio de aquecimento a vácuo do ácido lático. O polímero obtido apresentava baixa massa molecular e propriedades

mecânicas inadequadas para aplicações comerciais (MEHTA, KUMAR, *et al.*, 2005). A DuPont foi a primeira empresa a patentear uma rota tecnológica para síntese de PLA de maior peso molecular, em 1954 (MOTTA, DUEK, 2006).

O interesse sobre o PLA ficou restrito à área científica até o final da década de 60, quando foi demonstrado que a degradação do polímero poderia ocorrer *in vivo*. Essa propriedade, associada à atoxidade do material, criou novas possibilidades de aplicação na área médica (MOTTA, DUEK, 2006).

Os avanços mais relevantes para o mercado de PLA começaram a surgir no início dos anos 90. O início dessa década foi marcado por um choque do preço do petróleo por decorrência da Guerra do Golfo (LOONEY, 1992). Simultaneamente, observou-se uma maior preocupação com as mudanças climáticas causadas pela atividade humana. Algumas das iniciativas internacionais culminaram na assinatura do Protocolo de Quioto, um tratado cujo objetivo era comprometer os signatários a reduzir a emissão de CO₂ (UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE, 2021). Esse contexto incentivou a exploração de alternativas sustentáveis aos produtos de origem fóssil existentes.

Nessa época, a Cargill Inc., uma das maiores produtoras de commodities agrícolas do mundo, estava interessada em explorar novas tecnologias para o aproveitamento de carboidratos vegetais. Em 1997, a empresa estabeleceu uma joint venture com a Dow Chemicals sob o nome NatureWorks, com o objetivo de introduzir resinas de PLA no mercado de plásticos. A primeira planta de PLA no mundo entrou em operação nos Estados Unidos em 2002, com capacidade de produção de 140.000 toneladas/ano. A aposta das empresas era lançar um bioplástico que pudesse competir com as commodities de origem fóssil em diversos setores, como o têxtil e o de embalagens (JAMSHIDIAN, TEHRANY, *et al.*, 2010).

A NatureWorks se manteve como o único player relevante do mercado de PLA por muitos anos. No decorrer das atividades, a Dow vendeu sua parte da joint venture para a Cargill e outras empresas se juntaram a NatureWorks posteriormente. Em 2011, já com participação da petroquímica tailandesa PTT Chemical, foi anunciada a abertura de uma nova planta na Tailândia, que nunca chegou a ser concretizada (BIOPLASTIC NEWS, 2018).

Ao longo dos anos, outras empresas entraram no mercado de PLA por meio de joint ventures. É o caso da Futerro, criada pela Galactic, uma das

maiores produtoras de ácido láctico, e a Total Petrochemicals. Uma planta com capacidade de 1500 toneladas/ano foi inaugurada na Bélgica em abril de 2010. (PLAST EUROPE, 2010)

Outra iniciativa importante foi tomada pela Purac, que já demonstrava interesse no mercado de PLA desde 2008. A grande produtora de ácido láctico desenvolveu um método de produção para o bioplástico em parceria com a Sulzer Chemtec, empresa de engenharia suíça (SULZER, 2021).

Inicialmente, a estratégia da Purac era fornecer os lactídeos e a tecnologia para que outras empresas transformadoras produzissem o PLA. (OROSKI, 2013). A Synbra Technology, produtora de poliestireno expandido (EPS), iniciou, em 2012, a operação de uma planta de PLA com capacidade de 5000 t/ano, utilizando a tecnologia Purac/Sulzer (ONDREY, 2021).

Em 2018, foi lançada mais uma joint venture para produção de PLA, desta vez entre a produtora de ácido láctico e antiga Purac, Corbion, e a Total. Já no final do mesmo ano, uma planta com capacidade de 75 mil toneladas/ano entrou em operação, a segunda maior do mundo. As empresas adotaram um modelo integrado de produção, no qual o monômero para a síntese é produzido em uma outra planta com capacidade de 100 mil toneladas/ano (BIOPLASTIC NEWS, 2018).

É interessante destacar que a maioria do PLA produzido no mundo, embora seja proveniente de fontes renováveis, é de primeira geração, isto é, produzido a partir de matérias-primas alimentícias, como cana-de-açúcar, milho e beterraba. Em 2015, a Corbion conseguiu sintetizar, em laboratório, a primeira resina do polímero a partir de insumos não-alimentícios como a palha de milho.

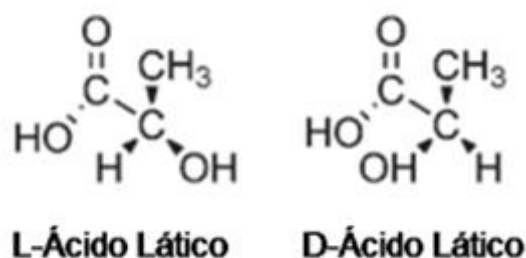
Os movimentos mais recentes da indústria caminham em direção à expansão e modernização dos processos de obtenção do PLA. A Corbion tem planos para implementar uma nova na planta da Tailândia até 2023 (GUZMAN, 2021). Por outro lado, a NatureWorks também realiza investimentos no sentido de ampliar sua capacidade produtiva. Até o fim de 2021, a empresa planeja concluir um novo projeto que aumenta a eficiência de purificação dos monômeros usados na polimerização (NATUREWORKS, 2020).

III.3. Síntese do PLA

III.3.1. Síntese do Ácido Láctico

O ácido láctico é a unidade estrutural utilizada na obtenção do PLA. Caracteriza-se por ser um ácido orgânico de ocorrência natural, sendo produzido por diversas espécies de mamíferos, plantas e microorganismos. Por possuir um carbono quiral em sua estrutura, o ácido láctico existe sob a forma de dois isômeros ópticos, denominados L- e D- (CIPRIANO, 2013). A figura 2 apresenta a estrutura química dos dois enantiômeros.

Figura 2 – Estrutura química dos enantiômeros do ácido láctico (AURAS, HARTE, *et al.*, 2004).



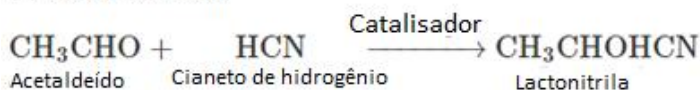
O interesse comercial no ácido láctico é justificado pela sua grande gama de aplicações na indústria. Além da produção de PLA, o composto é usado como intermediário nas indústrias de alimentos, cosméticos e medicamentos. O isômero L-, em particular, é o mais visado para aplicações, uma vez que é facilmente assimilado pelo organismo humano (BENEVENUTI, 2016).

A síntese do ácido láctico pode ser realizada de duas formas: por meio de rota biotecnológica ou por meio de rota puramente química, sendo a primeira a mais amplamente utilizada para a obtenção do ácido em escala industrial (BENEVENUTI, 2016).

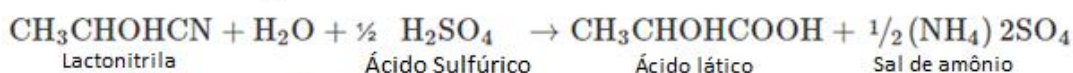
A rota química consiste em realizar uma hidrólise de lactonitrilas em ácidos fortes, produzindo uma mistura dos isômeros D- e L- do ácido láctico. Inicialmente, reage-se cianeto de hidrogênio e acetaldeído em fase líquida e alta pressão, obtendo-se lactonitrila. Este composto é posteriormente hidrolisado por HCl ou H₂SO₄, produzindo ácido láctico. A etapa de purificação consiste em esterificar o ácido recém-obtido com metanol, com subsequente destilação e hidrólise aquosa. A Figura 3 apresenta as reações envolvidas (NARAYANAN, ROYCHOUDHURY, *et al.*, 2004).

Figura 3 – Reações envolvidas na produção de ácido láctico via rota química (adaptado de Narayanan, Roychoudhury, et al. (2004))

(a) Adição de HCN



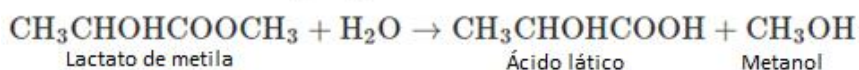
(b) Hidrólise por Ácido Sulfúrico



(c) Esterificação



(d) Hidrólise por água



O ácido láctico obtido por essa rota é uma mistura racêmica dos dois enantiômeros, em contraste com aquele produzido por rota biotecnológica, que é composto por apenas um dos isômeros. O grau de pureza óptica do ácido láctico tem grande influência sobre as suas propriedades físicas e, conseqüentemente, sobre as do PLA. Quanto maior a pureza, maior será o grau de cristalinidade e o ponto de fusão do PLA, ampliando a possibilidade de aplicações comerciais desse plástico. Por esta razão, a rota biotecnológica é a mais amplamente adotada pelos produtores de ácido láctico. (GHAFFAR, IRSHAD, *et al.*, 2014)

A rota biotecnológica caracteriza-se por um processo de fermentação, seguido de etapas de purificação. As matérias-primas que podem ser empregadas no processo consistem em diferentes tipos de biomassa. Podem ser utilizadas biomassa de primeira geração (milho, melão), segunda geração (bagaço de cana, celulose) ou terceira geração (algas) (BENEVENUTI, 2016).

A escolha da matéria-prima determina qual o tipo de pré-tratamento será necessário antes da fermentação. A maioria dos agentes fermentativos só consegue assimilar monossacarídeos, como glicose e lactose. Carboidratos de maior complexidade, como amido, precisam ser hidrolisados em compostos mais simples. Os polissacarídeos altamente insolúveis e resistentes, como a celulose, necessitam de pré-tratamento mais intenso, com processamento físico e hidrólise ácida ou enzimática (BENEVENUTI, 2016).

Os agentes fermentativos utilizados são bactérias ou fungos filamentosos. A fermentação fúngica apresenta algumas desvantagens em relação à bacteriana, principalmente a necessidade de intensa aeração e formação de subprodutos que diminuem o rendimento de ácido lático. A maioria dos estudos e processos industriais utilizam bactérias para a fermentação (WEE, KIM, *et al.*, 2006).

As condições operacionais da fermentação devem ser cuidadosamente controladas não apenas para aumentar a produtividade, como também para evitar a perda dos agentes fermentativos. As variáveis ideais de operação dependem do microrganismo utilizado. Na maior parte dos casos, o pH é mantido entre 5-5,8 e a temperatura entre 25-35 °C (BENEVENUTI, 2016).

A produção de ácido lático reduz o pH do meio reacional, o que é contrabalanceado com a adição de um agente tamponante. Na maioria dos processos, utiliza-se CaCO₃, pois, além de controlar a variação de pH, também fornece cálcio para os agentes fermentativos (BENEVENUTI, 2016).

A fermentação pode ser conduzida em batelada (simples ou alimentada)⁴ ou em regime permanente. Os processos descontínuos produzem ácido lático em maior concentração, enquanto os contínuos apresentam maior produtividade (WEE, KIM, *et al.*, 2006).

A batelada simples é pouco utilizada em escala industrial devido à grande dificuldade em controlar o pH do meio. Além disso, a alta concentração de nutrientes no início do processo pode ter efeito inibitório sobre o crescimento dos microrganismos. Tais problemas são evitados nos processos contínuos e de batelada alimentada (BENEVENUTI, 2016).

O ácido lático produzido é submetido a um processo de recuperação para diminuir perdas e aumentar a pureza. O meio fermentado contém diversas impurezas, como açúcares e biomassa, que precisam ser removidos (GHAFAR, IRSHAD, *et al.*, 2014). Dentre os processos existentes, destacam-se: precipitação, extração com solvente e destilação a vapor.

A precipitação é o método convencional de separação do ácido lático. Durante a fermentação, o carbonato de cálcio adicionado converte o ácido em

⁴ Batelada simples é um tipo de processo descontínuo, no qual os substratos são adicionados no reator apenas no início da operação. Na batelada alimentada, faz-se a introdução dos substratos e retirada dos produtos em intervalos regulares de tempo (LONGOBARDI, 1994)

lactato, sua forma ionizada. Após uma etapa de filtração, o lactato é regenerado a ácido láctico por meio de acidificação com H_2SO_4 . Esse método gera gipsita ($CaSO_4$) como subproduto, que deve ser separada do ácido láctico em uma nova filtração (BENEVENUTI, 2016).

Esse processo de recuperação apresenta altos custos associados à compra de reagentes e etapas de filtração, podendo corresponder a 50% do custo total de produção. Inicialmente, a alta produção de gipsita e outros efluentes também eram uma desvantagem, pois tornavam o processo muito oneroso e muito danoso ao meio-ambiente. (BENEVENUTI, 2016).

Para diminuir os impactos causados pela produção de gipsita, a indústria de ácido láctico buscou evoluir seus processos. Em 2008, por exemplo, a NatureWorks já havia aprimorado sua nova tecnologia fermentativa, de modo a operar em pHs menores, diminuindo a quantidade de $Ca(OH)_2$ utilizado e, conseqüentemente, a gipsita produzida (VINK, DAVIES, *et al.*, 2010). A Corbion também possui patentes similares que descrevem tecnologias com uso menos intensivo do hidróxido.

Outro processo de purificação consiste na extração com solvente. A recuperação é feita adicionando-se um solvente orgânico imiscível à mistura aquosa original, geralmente alquilaminas. O ácido láctico é recuperado como lactato na fase orgânica. As principais desvantagens desse método são os altos custos tanto de equipamentos quanto de recuperação do solvente (BENEVENUTI, 2016).

A destilação a vapor consiste em separar substâncias pouco hidrofílicas de uma solução aquosa por meio de arraste com vapor de água. Este processo requer grandes taxas de evaporação para recuperar volumes relativamente pequenos de ácido láctico, o que torna muito elevado o custo associado ao consumo energético (BENEVENUTI, 2016).

Ainda existem outros processos não convencionais para separação do ácido láctico descritos em patentes e artigos recentes, tais como a eletrodialise e ultrafiltração por membrana (BENEVENUTI, 2016).

A eletrodialise é um método de separação baseado na ação de um potencial elétrico aplicado sobre íons em um sistema. No caso em questão, uma membrana de troca iônica é introduzida no meio fermentativo com o objetivo de separar os íons *in situ*. Desse modo, evita-se a acidificação do meio reacional,

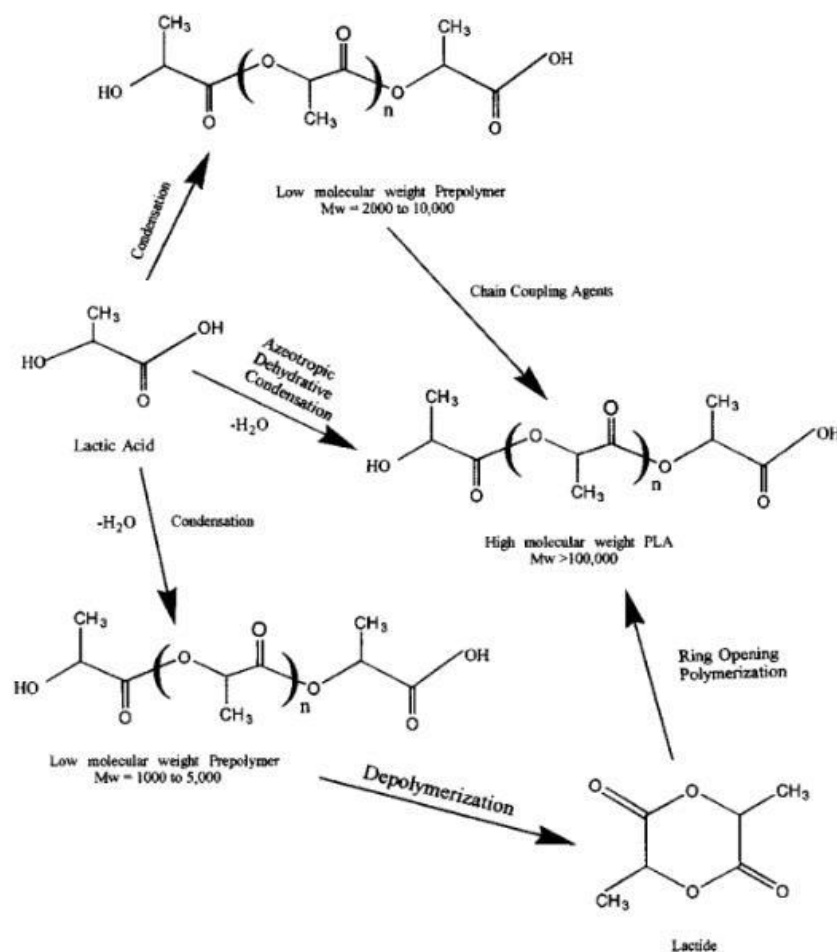
removendo a necessidade de utilização de agentes neutralizantes. O alto custo da membrana e a decomposição térmica do produto, no entanto, são alguns dos entraves para aplicação industrial (BENEVENUTI, 2016).

Similarmente à eletrodialise, a ultrafiltração é um processo de separação que ocorre concomitantemente à fermentação. Introduce-se membranas semipermeáveis com diâmetros entre 0,001-0,005 μm no sistema e aplica-se um diferencial de pressão para facilitar o movimento das moléculas. Todavia, os eventuais acúmulos de partículas na superfície da membrana diminuem a eficiência de separação, o que demanda uma aplicação maior de diferencial de pressão (BENEVENUTI, 2016).

III.3.2. Síntese do Poliacido Lático

A obtenção do PLA utilizando ácido lático pode se proceder de duas formas: por policondensação ou por polimerização via formação de anel lactídeo. As características do polímero produzido, e conseqüentemente suas aplicações, dependem diretamente do processo adotado. A Figura 4 apresenta um esquema das rotas de obtenção do PLA (GARLOTTA, 2001).

Figura 4 – Rotas de síntese do PLA (GARLOTTA, 2001).



A policondensação direta consiste na esterificação dos monômeros, que só é possível devido a presença dos grupos OH e COOH na estrutura química do ácido láctico (CIPRIANO, 2013). Dentre as rotas disponíveis, esta é a mais simples e a que possui menor custo operacional.

O polímero sintetizado por esse processo possui baixo peso molecular e com propriedades mecânicas ruins, limitando possíveis aplicações. A alta viscosidade do meio reacional associada ao desfavorecimento do equilíbrio químico pela presença de água são alguns fatores que dificultam a obtenção de PLA de maior massa (CARVALHO, 2013).

O peso molecular pode ser aumentado empregando-se extensores de cadeia e catalisadores, sendo possível a obtenção de um polímero com massa molecular superior a 100.000 Daltons (GARLOTTA, 2001). A água pode ser removida adicionando-se um solvente com o sistema operando em baixas

pressões e altas temperaturas. Essas medidas, no entanto, encarecem o processo e o produto final (JAMSHIDIAN, TEHRANY, *et al.*, 2010).

Existe ainda outra forma de realizar a policondensação e obter polímeros de alto peso molecular. Empregando-se um solvente orgânico que forme uma mistura azeotrópica com a água, destila-se o ácido láctico enquanto a policondensação ocorre. O solvente é refluxado e retorna ao reator através de peneira molecular, o que facilita a remoção de água (GARLOTTA, 2001).

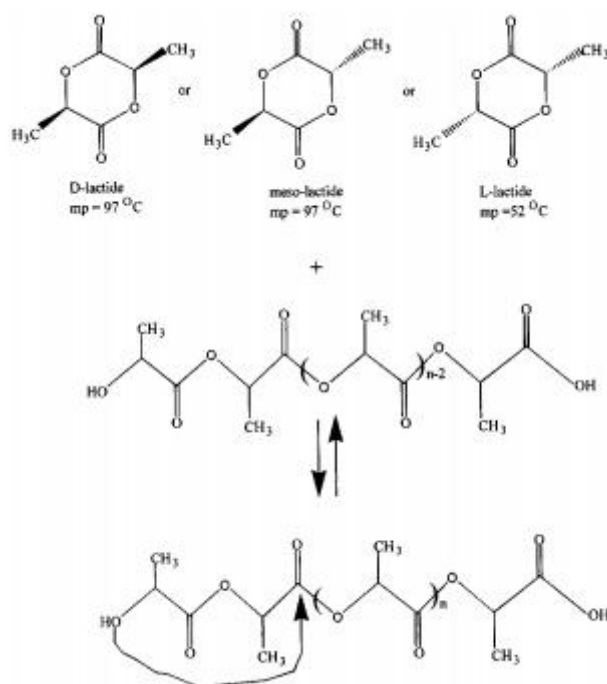
Essa técnica dispensa o uso de extensores de cadeia, mas necessita de elevadas quantidades de catalisador para favorecer a cinética química. A consequência é a produção de PLA altamente impuro, que é tóxico e pode sofrer degradação indesejada (GARLOTTA, 2001).

A rota preferencialmente usada pela indústria para a síntese do PLA é a polimerização de anel lactídeo. Trata-se de um processo em três etapas: policondensação do ácido láctico em oligômero, formação de um anel lactídeo (dímero) e polimerização via abertura do anel. O PLA produzido por essa rota também é referido por polilactídeo (LASPRILLA, MARTINEZ, *et al.*, 2012).

A primeira etapa de policondensação se procede até que haja formação de polímeros de baixa massa molecular, enquanto a água é removida por evaporação. Em seguida, ocorre uma despolimerização a baixas pressões, formando um dímero cíclico, denominado lactídeo (CIPRIANO, 2013, GARLOTTA, 2001).

Assim como o ácido láctico, o anel lactídeo existe sob a forma de enantiômeros, a saber, L-, D- e meso. A despolimerização do oligômero produz uma mistura dos três isômeros, cuja proporção depende da estrutura dos monômeros utilizados, temperatura e catalisador. A Figura 5 apresenta as possíveis estruturas do lactato, assim como o mecanismo de formação do anel (GARLOTTA, 2001).

Figura 5 – Formação do anel lactídeo (GARLOTTA, 2001).



Os lactídeos são submetidos a um processo de purificação por meio de destilação a vácuo em altas temperaturas. Finalmente, promove-se a abertura dos anéis com subsequente polimerização na presença de catalisadores organometálicos, obtendo-se um polímero de alta massa molecular. Esse método permite um alto controle do peso do PLA por meio de manipulação das condições operacionais, como temperatura, pressão e tempo de residência (GARLOTTA, 2001, HU, DAOUD, *et al.*, 2016, LASPRILLA, MARTINEZ, *et al.*, 2012).

Em comparação com a policondensação direta, a abertura do anel tem menor tempo de reação e maiores taxas de conversão. Entretanto, essa rota apresenta um custo elevado, principalmente no que se refere à etapa de purificação (JUNIOR, ZEITUNI, *et al.*, 2015).

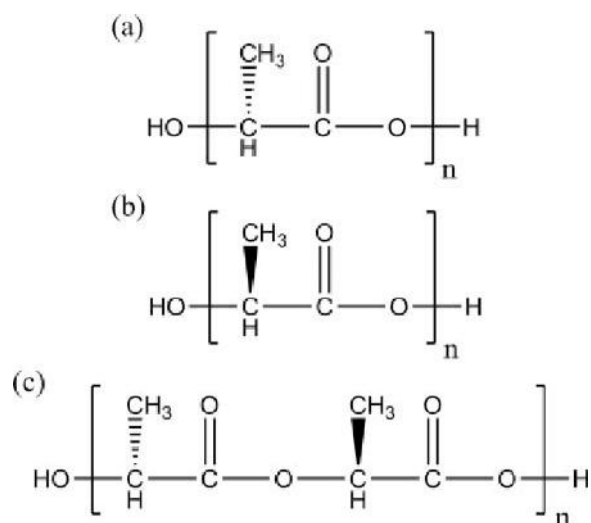
III.4. Características Físico-químicas do PLA

O PLA é um termoplástico que pode ser processado por diversos métodos tradicionais, como extrusão, injeção e termoformação. No aspecto macroscópico, é um plástico transparente, semelhante ao PET e ao PS. Algumas

de suas propriedades o tornam interessante alternativa aos polímeros plásticos tradicionais (MENEZES, 2015).

Estruturalmente, o poli ácido láctico é um poliéster alifático e que, assim como seu monômero formador, existe sob a forma de estereoisômeros: poli-l-ácido láctico (PLLA), poli-d-ácido láctico (PDLA) e poli-d,l-ácido láctico (PDLLA). O PLA comercial é um blend feito a partir de PLLA/PDLA ou PLLA/PDLLA. A figura 6 apresenta as estruturas químicas dos isômeros (LASPRILLA, MARTINEZ, *et al.*, 2012).

Figura 6 – Estrutura química a) PLLA, b) PDLA c) PDLLA (CHAN, VANDI, *et al.*, 2018).



O PLA é um material rígido com taxa de cristalização relativamente baixa. O grau de cristalinidade depende diretamente da proporção de enantiômeros presentes na estrutura. Quanto mais puro opticamente for o polímero (estruturas D- ou L- puras), mais cristalino será. Por outro lado, estruturas com alto grau de mistura racêmica tendem a ser amorfas (CIPRIANO, 2013).

É importante destacar que o grau de cristalinidade exerce grande influência sobre as propriedades do polímero. Em geral, um alto percentual de cristalinidade é acompanhado por altas rigidez e temperaturas de fusão e transição vítrea. Em contrapartida, o material se torna mais frágil e com menor resistência ao impacto (CIPRIANO, 2013). A tabela 3.4.1 compara algumas propriedades do PLA com as de outros polímeros.

Tabela 4 – Propriedades do PLA e outros polímeros. Adaptado de Cipriano (2013).

| | T _g (°C) | T _m (°C) | Resistência à Tração (Mpa) | Módulo de Tensão (Mpa) | Alongamento na ruptura (%) |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| PLA | 40 a 70 | 130 a 180 | 48 a 53 | 3500 | 30 a 240 |
| LDPE | -100 | 98 a 115 | 8 a 20 | 300 a 500 | 100 a 1000 |
| PCL | -60 | 59 a 64 | 4 a 28 | 390 a 470 | 700 a 1000 |
| Amido | - | 110 a 115 | 35 a 80 | 600 a 850 | 580 a 820 |
| PBAT | -30 | 110 a 115 | 34 a 40 | - | 500 a 800 |
| PTMAT | -30 | 108 a 110 | 22 | 100 | 700 |
| PS | -30 | 100 | 34 a 50 | 2300 a 3300 | 1,2 a 2,5 |
| Celulose | 70 a 115 | - | 55 a 120 | 3000 a 5000 | 18 a 55 |
| PHB | 0 | 140 a 180 | 25 a 40 | 3500 | 5 a 8 |
| PHA | -30 a 10 | 70 a 170 | 18 a 24 | 700 a 1800 | 3 a 25 |
| PHB-PHV | 0 a 30 | 100 a 190 | 25 a 30 | 600 a 1000 | 7 a 15 |
| PVA | 58 a 85 | 180 a 230 | 28 a 46 | 380 a 530 | - |
| Acetato de Celulose | - | 115 | 10 | 460 | 13 a 15 |
| PET | 73 a 80 | 245 a 265 | 48 a 72 | 200 a 4100 | 30 a 300 |
| PGA | 35 a 40 | 225 a 230 | 890 | 7000 a 8400 | 30 |
| PEA | -20 | 125 a 190 | 25 | 180 a 220 | 400 |

As propriedades mecânicas do PLA tendem a variar dependendo da massa molar do polímero, da orientação das cadeias moleculares e do grau de cristalinidade (GUPTA, REVAGADE, *et al.*, 2007). Geralmente, para valores de massa elevados, o polilactídeo apresenta boas propriedades mecânicas, com resistência à tração comparáveis aos do PET e PS, o que é interessante para a produção de embalagens. Em contrapartida, o polímero apresenta baixa resistência ao impacto e baixo alongamento na ruptura quando comparado ao PS e o polietileno (CIPRIANO, 2013).

Quanto às propriedades térmicas, o PLA opticamente puro apresenta uma temperatura de transição vítrea próxima a 58°C e temperatura de fusão próxima a 180 °C. Um dos grandes fatores que dificultam o processamento do PLA é a baixa resistência térmica do polímero. Em temperaturas próximas a 200 °C, ocorrem quebras na cadeia polimérica, resultando em grandes perdas de massa (CIPRIANO, 2013, LIM, AURAS, *et al.*, 2008).

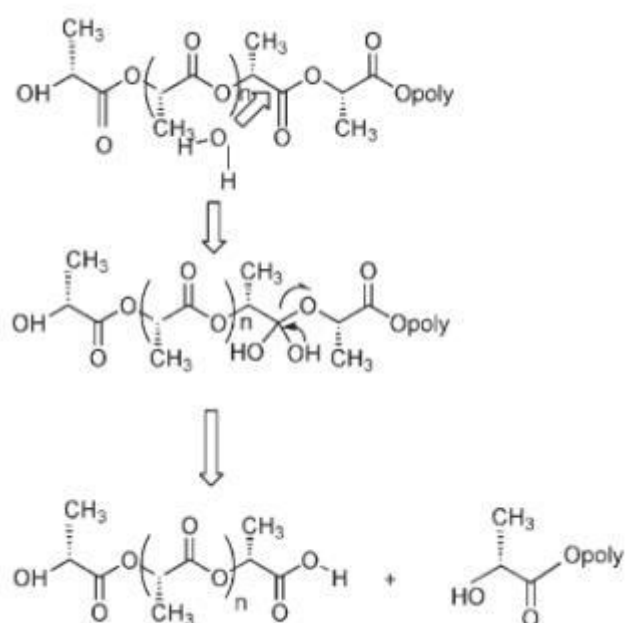
As propriedades de barreira são um importante parâmetro para a fabricação de embalagens, principalmente as alimentícias. Idealmente, o polímero utilizado neste tipo de aplicação deve oferecer resistência a passagem de gases, vapor de água e outras moléculas (JAMSHIDIAN, TEHRANY, *et al.*, 2010). Quanto maior o grau de cristalinidade, maior será a resistência que o material oferece à transferência de massa. Estudos comparativos entre o PLA e outros polímeros apontam que, para o vapor de água, o polilactídeo apresenta

maior coeficiente de permeabilidade do que o PET e menor do que o PS. Para outras substâncias como O₂, CO₂ e N₂, o PLA possui melhor performance como barreira em comparação ao PS e pior em relação ao PET (CIPRIANO, 2013).

De modo a melhorar algumas das propriedades do PLA e, por consequência, ampliar a gama de aplicações do polímero, diversas estratégias vêm sendo adotadas. Dentre elas, pode-se citar a incorporação de aditivos, como os agente nucleantes que aumentam a taxa de cristalização do PLA (CIPRIANO, 2013). A formação de estereocomplexos de PDLA e PLLA resultam em um material de diferentes propriedades em relação aos homopolímeros. Em particular, obtém-se um produto final de maior temperatura de fusão, na faixa entre 220-230°C (CIPRIANO, 2013). O PLA também atrai grande interesse do ponto de vista da área médica por sua alta biocompatibilidade e atoxicidade. O ácido lático é um metabólito comumente produzido pelo corpo humano e, portanto, consegue ser facilmente assimilado. Considerando que o organismo humano só produz o L-ácido lático, implantes de PLLA tem degradação mais rápida quando comparados ao PDLLA (LASPRILLA, MARTINEZ, *et al.*, 2012).

A biodegradabilidade é um dos principais diferenciais do PLA em relação a outros polímeros de origem fóssil. Em condições ambientais, a ação de microrganismos sobre esse material é altamente dificultada. Experiências mostram que, mesmo em compostagem de jardim, o PLA permanece intacto após semanas. O polímero apresenta boa biodegradabilidade apenas quando submetido à condição de compostagem industrial (CIPRIANO, 2013).

Para a biodegradação do PLA, são necessárias duas etapas. Inicialmente, a massa molar precisa ser reduzida de modo a facilitar o ataque microbiano. Reações de hidrólise são conduzidas em temperaturas próximas a 58 °C. A quebra ocorre em pontos aleatórios da estrutura. O mecanismo reacional é ilustrado na Figura 7. Após a redução do PLA em oligômeros, a etapa seguinte consiste na degradação enzimática pelos agentes microbianos, produzindo CO₂, água e biomassa residual (CIPRIANO, 2013).

Figura 7 – Hidrólise do PLA (AURAS, HARTE, *et al.*, 2004).

O polímero também pode ser degradado por processos térmicos em altas temperaturas. Neste caso, o polímero é convertido diretamente ao ácido láctico, o que configura uma possível rota de reciclagem da matéria-prima. Pode ocorrer, no entanto, formação de produtos indesejados, como acetaldeído e monóxido de carbono (CIPRIANO, 2013).

As propriedades descritas nesta seção permitem que, no cenário atual, o PLA tenha um vasto potencial de aplicações em diferentes áreas. O polímero, que antes era limitado ao nicho da área médica, passou ser empregado na confecção de embalagens e na indústria têxtil (VINK, RÁBAGO, *et al.*, 2003). Atualmente, a expansão do campo de aplicações abrange outras áreas, como a de bens de consumos duráveis e a de impressão 3D. A tabela 3.3.4.2 apresenta um resumo das principais aplicações do PLA.

Tabela 5 – Principais aplicações do PLA. Elaboração própria.

| Setor | Aplicações |
|------------------------------|--|
| Embalagens | Embalagens de laticínios; copos descartáveis; garrafas; sacolas |
| Têxtil e não tecidos | Roupas; lenços; tapetes; fraldas |
| Bens duráveis Agricultura | Brinquedos; móveis; eletrônicos Filmes biodegradáveis; containers |

III.5. Descrição do Processo Produtivo Escolhido

Nesta seção, serão detalhados os processos industriais escolhidos para a obtenção do ácido láctico e do PLA, bem como as matérias-primas a serem empregadas. Os processos aqui descritos serão a base para todo o estudo de viabilidade econômica a ser desenvolvido ao longo deste trabalho.

III.5.1 Matéria-prima

Conforme discutido ao longo deste capítulo, o PLA é um polímero produzido exclusivamente a partir de ácido láctico, deixando a escolha da matéria-prima restringida à obtenção deste último.

A primeira decisão pertinente a ser tomada é o tipo de rota de obtenção. O ácido láctico pode ser obtido por via química ou biológica. Como citado anteriormente, a rota biotecnológica apresenta algumas vantagens para implementação industrial. Tais fatores vantajosos incluem: a utilização de matéria-prima barata e de fonte renovável, baixo consumo de energia, baixas temperaturas operacionais (ABDEL-RAHMAN, TASHIRO, *et al.*, 2011) e obtenção de um produto opticamente puro (WEE, KIM, *et al.*, 2006).

A maioria das empresas produtoras de ácido láctico optam pela via biológica. Estima-se que, em 2009, entre 70-90% desse composto era produzido por fermentação (ENDRES, SIEBERT-RATHS, 2011). A Corbion e a NatureWorks, por exemplo, adotam a rota biológica a partir de um sistema de produção totalmente integrado, desde o cultivo da matéria-prima até a síntese do PLA.

Todos esses fatores contribuem para a escolha da rota fermentativa para este trabalho. Em especial, para o caso brasileiro, o amplo acesso a matérias-primas que podem ser usadas para fermentação também possui grande relevância para essa escolha.

Definida qual rota para a produção de ácido láctico será usada, o próximo passo é a especificação da matéria-prima. Os processos fermentativos podem

ocorrer utilizando produtos agrícolas alimentícios, produzindo ácido de primeira geração, ou resíduos, para ácido de segunda geração.

Atualmente, a produção de ácido láctico industrial consiste, essencialmente na fermentação de produtos agrícolas, como o milho e a cana-de-açúcar. Diversos artigos e patentes, no entanto, exploram outras possíveis matérias-primas, em especial as não-alimentícias, indicando uma possível mudança de paradigma dessa indústria no futuro.

Diversos autores descrevem processos cujo objetivo é o aproveitamento de resíduos como matéria-prima. Kwan, Hu, *et al.* (2018) propõem uma rota com uso de alimentos desperdiçados em centros urbanos. A principal diferença técnica desse processo consiste em uma etapa de pré-tratamento, na qual a matéria-prima é hidrolisada por fungos até a obtenção de açúcares fermentáveis.

Gezae Daful e Görgens (2017) também descrevem uma rota utilizando bagaço de cana como potencial matéria-prima. Nesse caso, também se faz necessária uma etapa de pré-tratamento antes da fermentação. Em linhas gerais, o bagaço é submetido a vapor de alta pressão, o que resulta na separação de duas fases: líquida, que contém hemicelulose, e sólida, contendo celulose. A fração líquida pode ser fermentada diretamente por espécies microbianas apropriadas, enquanto a fração sólida ainda precisa por um outro processo de hidrólise antes da fermentação.

Rotas de produção para ácido láctico de segunda geração já existem em escala laboratorial e, embora ainda sejam necessários anos de pesquisa para a implementação a nível industrial competitivo, as principais produtoras de PLA já buscam desenvolver essas tecnologias (CORBION, 2021).

Para a produção do ácido de primeira geração, existem diversos insumos agrícolas que podem ser utilizados na fermentação, a saber: milho, cana-de-açúcar, beterraba, dentre outros. No caso da oportunidade brasileira, a cana-de-açúcar se apresenta como uma interessante opção de matéria-prima. O país é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com previsão de produção de mais de 655 milhões de toneladas na safra 2020/2021 (CONAB, 2020).

A composição média da cana-de-açúcar consiste em 10-16% de fibras, 75-82% de água, 1-2.5% de não-açúcares e 15.5-24% de açúcares fermentáveis (CANILHA, CHANDEL, *et al.*, 2012).

Comparada ao milho, outra matéria-prima proeminentemente usada, a cana pode ser facilmente utilizada na fermentação, uma vez que seus açúcares são simples. Vegetais como o milho apresentam alto teor de amido, de modo que necessitam de pré-tratamento para tornar o substrato adequado para a atividade bacteriana (MANANDHAR, SHAH, 2020).

A cana-de-açúcar é formada por uma parte fibrosa e outra líquida, a qual contém diversos tipos de açúcares. Em uma usina de açúcar tradicional, a cana é moída para a extração do caldo, que passa por sua vez passa por múltiplos ciclos de evaporação/cristalização para formação do açúcar comercial. A fração não-cristalizada, rica em açúcares, é denominada melaço, podendo ser vendida como produto alimentício (PACHÓN, VASKAN, *et al.*, 2018).

A proposta inicial para esse projeto é utilizar o subproduto da produção de açúcar, melaço, como matéria-prima para a obtenção de ácido láctico. Tal escolha é norteadada pela intenção de agregar valor a uma usina de açúcar convencional.

Essa escolha é fundamentada nos princípios estabelecidos pela bioeconomia. Tal termo foi definido pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) em 2009 como um conjunto de práticas que visem ao desenvolvimento de bioprodutos, de modo a gerar mudanças nos âmbitos socioeconômico e ambiental (OROSKI, 2013).

Tradicionalmente, uma usina de açúcar apresenta baixa intensidade tecnológica, de modo que existe um grande potencial de inovação na forma de aproveitamento da biomassa utilizada. Efetivamente, propõe-se integrar processos químicos e biológicos à usina, adaptando-a em uma biorrefinaria. Assim, pode-se manter a produção alimentícia e agregar valor ao melaço, convertendo-o em um produto de maior complexidade tecnológica e que pode ser usado, em algum grau, como um substituto de certos produtos de origem não-renovável.

III.5.2 Produção de ácido láctico

O processo de obtenção de ácido láctico aqui apresentado é uma adaptação do processo descrito por Manandhar e Shan (2020). A rota tecnológica escolhida consiste na fermentação com precipitação com solução de hidróxido de cálcio.

Trata-se do método de síntese mais amplamente utilizado na indústria, incluindo grandes produtores, como a Corbion e NatureWorks.

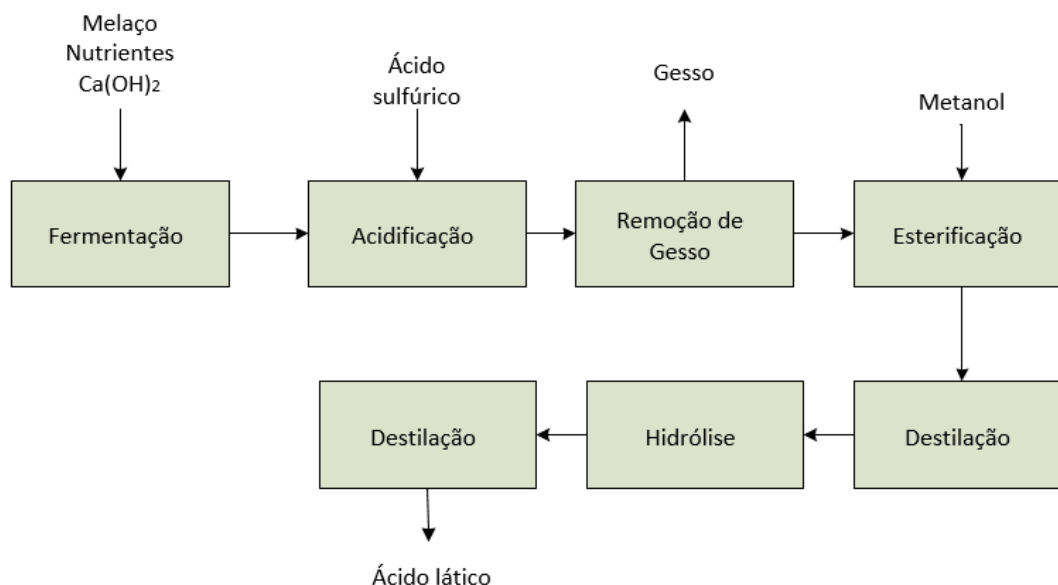
A produção de ácido láctico tem início quando o melaço obtido no refino do açúcar é diluído e empregado na fermentação por bactérias do gênero *Lactobacillus*. O processo ocorre em até 48 horas dentro de um tanque mantido a 32°C. À medida que a fermentação ocorre, o pH do meio é reduzido, o que prejudica o metabolismo bacteriano. A estabilização da acidez é feita com adição de solução de hidróxido de cálcio 30%. Ainda são acionados os demais nutrientes necessários para o crescimento bacteriano.

O produto obtido na fermentação é uma solução contendo ácido láctico, lactato de cálcio e açúcares não reagidos. Essa mistura é acidificada com ácido sulfúrico para a precipitação do cálcio sob a forma de sulfato (gipsita). O sólido formado é separado da solução por filtração.

As grandes dificuldades do processo de purificação do ácido láctico estão associadas a algumas de suas características físico-químicas, principalmente a sua baixa pressão de vapor e a alta afinidade com a água. O processo estudado propõe uma reação de esterificação do ácido láctico com metanol para produzir lactato de metila. Uma destilação é realizada para separar esse componente das demais impurezas.

O lactato de metila, recuperado como produto de topo, é enviado para uma seção de hidrólise, na qual ácido láctico e metanol são regenerados. Em uma nova destilação, esses dois componentes são separados; o álcool é reciclado de volta para o processo, enquanto o ácido passa por um secador para a remoção de água residual. A Figura 8 apresenta um diagrama de blocos simplificado do processo.

Figura 8 – Diagrama de blocos do processo de obtenção do ácido láctico (Adaptado de Manandhar e Shah (2020))



O balanço de massa do processo, necessário para o estudo de viabilidade econômica, é descrito a seguir. Uma tonelada de cana de açúcar gera 55 kg de melão e 280 kg de bagaço. A fermentação consegue atingir 90% para o ácido láctico. Para a produção de 100.000 toneladas/ano de ácido, são necessárias as seguintes quantidades de insumos: 6,8 t/h de ácido sulfúrico; 0,3 t/h de nutrientes; 15,6 t/h de solução de hidróxido de sódio e 0,1 t/h de metanol (MANANDHAR, SHAH, 2020).

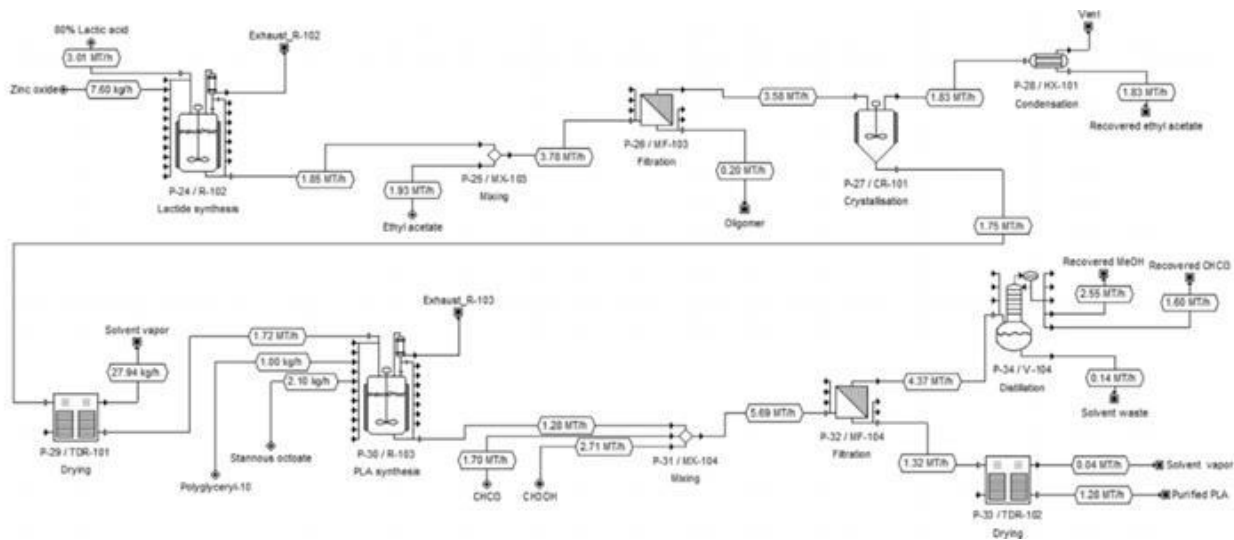
III.5.3 Produção de PLA

O processo para obtenção do PLA aqui estudado é o descrito por Kwan, Hu, *et al.* (2018). A síntese consiste na polimerização do ácido láctico via abertura de anel lactídeo. Conforme descrito na seção III.3.2, essa rota tecnológica em particular produz um PLA de propriedades mais adequadas para aplicações comerciais. Ademais, as maiores produtoras de PLA do mundo, NatureWorks e Corbion, utilizam processos muito semelhantes em suas plantas, com a mesma tecnologia, o que corrobora a escolha para este estudo.

O fluxograma do processo é apresentado na Figura 9. Inicialmente, ácido láctico é convertido à forma de dímero em um reator de mistura. Ao meio reacional, adiciona-se óxido de zinco, que tem a função de acelerar a

polimerização. A temperatura de operação é mantida dentro da faixa 80-220°C (KWAN, HU, *et al.*, 2018).

Figura 9 – Fluxograma do processo de produção do PLA (KWAN, HU, *et al.*, 2018).



O lactídeo cru produzido na etapa anterior é dissolvido em acetato de etila a 90°C por 10 minutos e, posteriormente, recristalizado a 4°C. O acetato de etila é recuperado por destilação a 40°C e 30kPa. Consegue-se obter lactídeo com 90% de pureza e oligômeros residuais que são descartados.

Em seguida, promove-se a abertura dos anéis lactídeos com subsequente polimerização a PLA em um reator de mistura a 200°C. São empregados nesta etapa um iniciador, poliglicerol (0,013mol%), e um catalisador, octoato de estanho (0,05 mol%).

A purificação do PLA obtido é feita por meio de dissolução em clorofórmio (1:1 p/v) e re-precipitação com metanol (1:3 v/v). A resina obtida é filtrada e secada a 40°C para remoção de solvente. O clorofórmio e o metanol são recuperados por destilação.

Os dados de balanço de massa do processo são apresentados a seguir. A conversão de ácido láctico para lactídeo é de 73%, enquanto a do lactídeo para PLA é de 74%. As taxas de recuperação durante as etapas de purificação do lactídeo e do polímero são 93% e 100%, respectivamente. Todas as porcentagens se referem à medida de massa (KWAN, HU, *et al.*, 2018).

IV. OFERTA E DEMANDA DE POLIÁCIDO LÁTICO

Nessa seção será abordado o cenário comercial do PLA tanto no Brasil quanto no mundo. Os objetivos dessa análise são compreender a situação mercadológica atual desse biopolímero, bem como os desafios esperados na criação de um mercado nacional de PLA.

IV.1. Cenário Atual do Poliacido Lático no Mundo

No ano de 2019, o mercado mundial de PLA foi avaliado em mais de 535 milhões de dólares, com crescimento médio anual esperado de 10% a 16% até 2027, podendo superar a marca de U\$1,5 bilhão (GRAND VIEW RESEARCH, 2021, RAIS, 2018). O aumento da demanda por embalagens plásticas flexíveis, o interesse cada vez maior pelos bioplásticos e o desenvolvimento de novas aplicações, aliados à regulação do mercado de plásticos convencionais, são os principais *drivers* do crescimento mundial do PLA (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

As mais importantes empresas no setor são a Total Corbion PLA e a NatureWorks, em um mercado com produção anual de PLA atingindo aproximadamente 294 mil de toneladas em 2019 (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2019, GRAND VIEW RESEARCH, 2021). Em comparação à atual capacidade instalada para produção superior a 342 mil toneladas/ano, a capacidade ociosa ou subutilizada chega a quase 50 mil toneladas de PLA ao ano (Tabela 6).

Tabela 6 – Capacidade produtiva e localização das principais plantas produtoras de PLA no mundo. (Adaptado de Jem e Tan (2020)).

| Empresa | Capacidade produtiva (ton/ano) | Localização |
|----------------|---------------------------------------|--------------------|
| NatureWorks | 150 000 | Estados Unidos |
| Total Corbion | 75 000 | Tailândia |
| Hisun | 45 000 | China |

| | | |
|-------------------|--------|---------------|
| BBCA & Galactic | 40 000 | China |
| COFCO | 10 000 | China |
| Hengtian | 10 000 | China |
| SuPLA | 10 000 | China |
| TongJieLiang | 10 000 | China |
| Synbra | 5 000 | Países Baixos |
| TianRen | 3 000 | China |
| Futero (Galactic) | 1 000 | Bélgica |
| Jiangxi KeYuan | 1 000 | China |
| Sulzer | <1 000 | Bélgica |
| Pyramid (Udhe) | <1 000 | China |

Algumas empresas detentoras de plantas menores planejam expansões, como é o caso da COFCO, com planta de capacidade produtiva de 10 000 toneladas ao ano na cidade de Changchun na China, com capacidade de expansão até 100 000 toneladas ao ano (PLAST EUROPE, 2018).

Até o ano de 2019, a maior área de aplicação era em embalagens, em especial descartáveis como talheres e bandejas e recipientes para armazenamento de alimentos. Entretanto, mesmo representando significativa porção da demanda, o uso para embalagens não é o único setor relevante para o PLA; o uso desse bioplástico na indústria têxtil, automotiva e até agrícola também são relevantes no atual cenário mundial (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

O uso do PLA em descartáveis é impulsionado primariamente pela procura de consumidores por embalagens sustentáveis, em especial biodegradáveis. Além disso, políticas públicas impedindo a comercialização de embalagens de uso único não biodegradáveis já em vigor em diversos países também contribuem para o aumento da demanda (GRAND VIEW RESEARCH, 2021). Leis desse tipo no Brasil, em geral, ainda englobam apenas canudos plásticos, mas já estão em vigor em diversas capitais, como São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, São Luís, Natal, Macapá, Teresina, Porto Velho, Vitória, Goiânia e Porto Alegre, e em alguns estados como Amazonas, Amapá, Acre, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Norte, Santa Catarina e São Paulo, além do Distrito Federal (A CRÍTICA, 2020, FIGUREIREDO, 2020, ZAREMBA, 2020). Além dos canudos, na cidade de São Paulo, utensílios de plástico descartáveis e não biodegradáveis, como copos, pratos e talheres, não podem ser distribuídos por estabelecimentos comerciais aos clientes (G1, 2020). Os principais benefícios técnicos do PLA percebidos por essa indústria, além da questão ambiental, são resistência a óleos e gorduras, a estética e a facilidade no uso para impressão 3D (GRAND VIEW RESEARCH, 2021). Apesar disso, assim como outros bioplásticos, o PLA ainda pode ser percebido como contaminante nas cadeias de reciclagem, como discutido na Seção III.1 - o que dificulta a introdução do material.

Como segundo maior mercado do PLA, o segmento têxtil é especialmente forte nos Estados Unidos, assim como o setor automobilístico. No caso têxtil, o PLA por apresentar excelentes características mecânicas como durabilidade. No caso da indústria automobilística, o PLA é um bom substituto para diversos outros materiais poliméricos, em especial para peças no motor e no interior do veículo, além de ajudarem a reduzir a massa total do veículo e ser ambientalmente mais favorável que as alternativas (GRAND VIEW RESEARCH, 2021).

Em 2019, vendas na América do Norte concentravam 42,9% do mercado, principalmente devido à crescente demanda por embalagens sustentáveis, juntamente o aumento na demanda por resinas para impressão 3D. A América do Norte é seguida pela região Ásia-Pacífica (como China, Japão, Índia, Austrália e Indonésia), e são nessas duas regiões que estão localizadas as maiores

plantas de PLA (Tabela 6). O terceiro maior mercado regional está localizado na Europa. (GRAND VIEW RESEARCH, 2021)

Em vista da grande concentração dos mercados automobilístico e têxtil nos Estados Unidos, além do principal motivador de transição para os bioplásticos no Brasil ser legislativo, com a proibição da distribuição de descartáveis não biodegradáveis, projeta-se que a maior fonte de demanda brasileira seria o setor de produtos descartáveis, bem como o segmento de embalagens.

Futuros desenvolvimentos tecnológicos e sociais podem trazer novos importantes setores para a competição no mercado local, tanto no caso do setor têxtil e automobilístico, como em segmentos ainda não vastamente explorados mundialmente, é o caso de próteses médicas ou ainda da impressão 3D.

IV.2. Possível Demanda Interna de PLA

O setor de embalagens movimentou mais de 80 bilhões de reais no Brasil em 2019, com plásticos representando 41% do faturamento total, ou mais de 32 bilhões de reais. Também no ano de 2019, a exportação de embalagens plásticas gerou um faturamento de US\$165,6 milhões, enquanto a importação desses produtos movimentou US\$337,6 milhões. Os principais mercados consumidores de embalagens são a indústria de alimentos e a indústria de bebidas (ABRE, 2020).

No Brasil, o PLA ainda tem um mercado muito limitado. Em 2019, foram importadas apenas 68 toneladas da resina (Tabela 7), com valor FOB médio por tonelada superior a US\$ 6 800,00. Nos últimos 5 anos, importou-se em média 76,67 toneladas de PLA ao ano, com valor FOB médio por tonelada de US\$ 5 372,29 (MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL, 2021). A quantidade importada no Brasil, tanto em termos mássicos quanto monetários é pequena, e essa inexistência de mercado local estabelecido é uma das principais barreiras ao projeto estudado.

Um dos possíveis motivos para essa falta de mercado estabelecido para o PLA, além da resina ainda ser um material relativamente novo no mercado, é o elevado custo de importação, com valores podendo superar os US\$ 6 000,00, que pode inviabilizar aplicações fora de mercados de nicho (MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL, 2021).

Tabela 7 – Valor FOB e massa importada de PLA ao ano no Brasil (MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL, 2021).

| Ano | Valor FOB (US\$) | Tonelada Líquida | Valor FOB por tonelada (US\$/ton) |
|------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| 2007 | 70 902 | 4,377 | 16 198,77 |
| 2008 | 37 123 | 2,172 | 17 091,62 |
| 2009 | 81 336 | 28,018 | 2 902,99 |
| 2010 | 77 902 | 15,710 | 4 958,75 |
| 2011 | 366 490 | 177,906 | 2 060,02 |
| 2012 | 200 951 | 59,808 | 3 359,93 |
| 2013 | 282 304 | 81,937 | 3 445,93 |
| 2014 | 299 616 | 70,712 | 4 237,13 |
| 2015 | 428 184 | 117,018 | 3 659,13 |
| 2016 | 589 350 | 111,863 | 5 268,50 |
| 2017 | 255 866 | 36,926 | 6 929,16 |
| 2018 | 334 777 | 49,468 | 6 767,55 |
| 2019 | 462 955 | 68,067 | 6 801,46 |

Além das peculiaridades do mercado local, o desenvolvimento da cadeia nacional de PLA ainda enfrenta desafios comuns mundialmente, como a falta de possíveis aplicações e a inexistência de cadeias direcionadas ao pós-consumo.

Mesmo já inserido em alguns mercados internacionais, o PLA ainda está disponível em poucos tipos de aplicações, como descrito na Seção IV.1. Essa ainda deficiente flexibilidade de uso, pode ser uma das grandes barreiras na adoção do material. Por outro lado, no mercado brasileiro, o PLA não encontra utilização nem em setores e nichos já estabelecidos internacionalmente, como para embalagens.

A não existência de estrutura de compostagem industrial nas grandes cidades brasileiras pode ser relevante barreira no estabelecimento de mercados de nicho para o PLA. Com grande atratividade na biodegradabilidade, o PLA necessita de estrutura adequada para atingir temperatura e pressão necessárias à degradação. Com a inexistência da cadeia de pós consumo, o PLA pode perder atratividade para consumidores de nicho, por perda desse grande diferencial em relação a outros bioplásticos já disponíveis no mercado, como o polietileno de

origem renovável, embora nesse caso só compitam em poucas aplicações, como para embalagens não descartáveis.

Por outro lado, a própria produção nacional em larga escala de polietileno de origem renovável revela a potencialidade da produção de bioplásticos no Brasil. Com capacidade instalada para produção de 200 mil toneladas/ano de PE de origem renovável (BRASKEM, 2021), o Brasil se mostra bem posicionado no mercado mundial de bioplásticos, indicando boa capacidade de escoamento de produção, seja para consumo doméstico ou exportação.

A definição do tamanho de um mercado consumidor nacional seria de grande auxílio no estabelecimento de uma escala de produção. Entretanto, o acúmulo de incertezas quanto à possível substituição de plásticos convencionais, bem como a competição por mercados de nicho com outros materiais com cadeias logísticas já estabelecidas, torna essa tarefa extremamente complexa e pouco precisa.

Por esse motivo, a escolha de escala não será diretamente resultante da análise do potencial mercado brasileiro, mas essa tem importante papel na análise de viabilidade do projeto. Dadas as limitações impostas, é relevante tratar de diversos cenários mercadológicos, e testar a o quão sensível o projeto é em relação a essas variáveis.

O estabelecimento de preços de venda é também importante processo mercadológico que precisa ser enfrentado no presente estudo. No caso da exportação, encontram-se valores semelhantes ao valor médio dos últimos 5 anos na importação brasileira. Por exemplo, o FOB descrito por (KWAN, HU, *et al.*, 2018) é igual a US\$ 5 215,00. Assim, não foi definida diferenciação entre valores de exportação e para o mercado interno, definidos como US\$ 5 372,29 por conveniência. Dessa forma, explorando os impactos da variação de preços nas seções de análise de sensibilidade.

Por fim, por falta de dados específicos sobre a distribuição das indústrias de embalagens e de descartáveis no território brasileiro, foram utilizados dados do setor de transformados plásticos como um todo para determinar a distribuição do mercado nacional potencial. Considerou-se, portanto, que a dispersão dessas indústrias pode ser suficientemente semelhante ao desejado sobre as indústrias de embalagem e descartáveis plásticos. Ainda como forma de contabilizar o tamanho das empresas, e conseqüentemente da produção, levou-se em

consideração apenas o número total de empregados por estado. Esses dados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Número de empregados e porcentagem do total por unidade federativa do Brasil. (ABIPLAST, 2019).

| Localidade | Empregos | Porcentagem do Total |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| BRASIL | 312 934 | 100% |
| Região Norte | | |
| Acre | 121 | 0,0% |
| Amapá | 0 | 0,0% |
| Amazonas | 7 981 | 2,6% |
| Pará | 1 005 | 0,3% |
| Rondônia | 253 | 0,1% |
| Roraima | 1 | 0,0% |
| Tocantins | 82 | 0,0% |
| Região Nordeste | | |
| Alagoas | 3 230 | 1,0% |
| Bahia | 10 702 | 3,4% |
| Ceará | 3 666 | 1,2% |
| Maranhão | 245 | 0,1% |
| Paraíba | 2 628 | 0,8% |
| Pernambuco | 9 888 | 3,2% |
| Piauí | 387 | 0,1% |
| Rio Grande do Norte | 1 325 | 0,4% |
| Sergipe | 864 | 0,3% |
| Região Centro-Oeste | | |
| Distrito Federal | 487 | 0,2% |
| Goiás | 4 828 | 1,5% |
| Mato Grosso | 1 531 | 0,5% |
| Mato Grosso do Sul | 1 982 | 0,6% |
| Região Sudeste | | |
| Espírito Santo | 3 248 | 1,0% |
| Minas Gerais | 19 320 | 6,2% |
| Rio de Janeiro | 15 191 | 4,9% |
| São Paulo | 136 187 | 43,5% |
| Região Sul | | |

| | | |
|-------------------|--------|-------|
| Paraná | 23 196 | 7,4% |
| Rio Grande do Sul | 27 519 | 8,8% |
| Santa Catarina | 37 067 | 11,8% |

É evidente a grande concentração da indústria de transformados plásticos nas regiões Sul e Sudeste. Juntas, essas duas regiões representam 86,3% de toda a mão de obra contrata no setor, contra 10,5% no Nordeste, e apenas 3,0% no Norte e 2,8% no Centro-Oeste. Portanto, para outras possíveis análises, as regiões Sul e Sudeste serão consideradas como principal possível polo consumidor de PLA no Brasil.

V. ESTRUTURAÇÃO DA OPORTUNIDADE NO CASO BRASILEIRO

Nesse seção, serão descritos importantes pontos para a estruturação do projeto proposto em território nacional. São eles: localização da planta produtora de PLA, modelo de negócio adotado e escala.

V.1. Estudo de Localização

Como previamente descrito, o fator determinante na escolha de localização de uma planta industrial é econômico. Assim, os principais fatores economicamente relevantes serão aqui analisados, para, de forma qualitativa, determinar-se a possível localização ideal para uma planta de poliácido láctico em território nacional.

V.1.1. Matéria-Prima

Como o projeto baseia-se no aproveitamento do melaço, é preciso entender a distribuição da produção de açúcar em território nacional.

De acordo com dados da Conab (2020), a produção de cana-de-açúcar na safra 2020/21 deve alcançar mais de 665 milhões de toneladas, com destaque para o estado de São Paulo, com número superior a 361 milhões de toneladas, ou 54,4% da produção nacional. Nesse estado também está concentrada a maior parte da fabricação de açúcar nacional, com produção estimada em mais de 26

milhões de toneladas na safra 2020/21, ou aproximadamente 63% do total brasileiro. Dessa maneira, considera-se o estado de São Paulo, como principal mercado capaz de fornecer condições de operação de forma integrada à indústria açucareira.

Apesar de dados fornecidos pela Conab e IBGE não especificarem nos relatórios a produção em cada município, é possível traçar um paralelo com a indústria alcooleira. Essa indústria muito conectada à indústria de produção de açúcar e tem dispersão geográfica semelhante, por apresentar os mesmos desafios logísticos de matéria-prima, e, muitas vezes, estarem localizadas na mesma planta para criar maior adaptabilidade aos preços flutuantes dessa *commodities* no mercado internacional. Assim, é possível extrair importantes conclusões da análise dos dados disponíveis para distribuição geográfica da indústria de etanol no território do estado de São Paulo.

Assim como na produção de cana-de-açúcar e açúcar, o estado de São Paulo abriga a maior produção de etanol do país, com mais de 47% do total nacional no ano de 2019, número muito superior a qualquer outra unidade da federação (CONAB, 2020).

Ainda segundo dados da ANP, as 15 maiores capacidades instaladas em 2017 no estado de São Paulo estão localizadas nos seguintes municípios: Guaíra, Pontal, Pitangueiras, Sertãozinho, Buritizal, Morro Agudo, Valparaíso, Promissão, Araras, Luiz Antônio, Planalto, Monte Aprazível, São Joaquim da Barra, Pereira Barreto e Catanduva. As produções de etanol por dia estão descritas na tabela 9.

Tabela 9 – Principais municípios produtores de etanol e capacidade instalada no estado de São Paulo no ano de 2017 (ANP, 2017).

| MUNICÍPIO | ETANOL: CAPACIDADE INSTALADA EM 2017 (m³/d) |
|------------------|---|
| GUAIRA | 4890 |
| PONTAL | 4710 |
| PITANGUEIRAS | 4200 |
| SERTÃOZINHO | 3450 |
| BURITIZAL | 2900 |
| MORRO AGUDO | 2850 |
| VALPARAÍSO | 2850 |
| PROMISSÃO | 2520 |
| ARARAS | 2420 |
| LUIS ANTÔNIO | 2400 |

| | |
|----------------------|------|
| PLANALTO | 2400 |
| MONTE APRAZÍVEL | 2200 |
| SÃO JOAQUIM DA BARRA | 2200 |
| PEREIRA BARRETO | 2100 |
| CATANDUVA | 2050 |

V.1.2. Mercado Interno

Como descrito anteriormente na Seção IV sobre o mercado de PLA, foi considerado que a demanda potencial interna brasileira é distribuída de tal forma a convergir com a atual distribuição de empregos no setor de transformados plásticos no país.

Dessa maneira, o estado de São Paulo representa o maior potencial mercado consumidor de PLA no país, pois é onde 43,3% dos empregos no setor estavam localizadas em 2019 (ABIPLAST, 2019). Além disso, o estado apresenta boa oportunidade de acesso aos mercados de estados próximos, e apresenta boa centralidade entre as regiões Sul e Sudeste, que, conjuntamente, agregam 83,5% dos empregos do setor (ABIPLAST, 2019) e, conseqüentemente essa mesma proporção do possível mercado consumidor de PLA.

Como já descrito na Seção IV, dentre o mercado potencial para o PLA, o principal foco é, atualmente, o setor de embalagens. A produção de embalagens, em geral, gera aumento de volume para transporte, bem como tem manuseio mais complexo que o material virgem na forma de *pellets*. Assim, é razoável entender que essa indústria está próxima ao mercado consumidor, portanto, localizando o mercado consumidor de PLA.

Segundo dados do (IBGE, 2021b), a população estimada em 2020 para o estado de São Paulo é de aproximadamente 46,3 milhões. Das quais 12,3 milhões (ou 26,6%) vivem na capital e 21,9 milhões (ou 47,3%) vivem na Grande São Paulo. Podem ser, esses, portanto, considerados como os mais promissores mercados consumidores de PLA.

Os custos logísticos de atendimento da demanda interna, portanto, também corroboram a instalação da planta no estado de São Paulo.

V.1.3. Porto de Exportação

O importante porto mais próximo dos possíveis locais de instalação da planta estudada, vistas as situações anteriormente dispostas de mercado consumidor e fornecedores potenciais, é o Porto de Santos e, portanto, parece ser o posto mais adequado de escoamento de PLA para o mercado externo. Dessa maneira, é relevante entender como as possíveis localizações podem afetar o custo relacionado à fretagem do produto enviado ao mercado externo.

A relevância, todavia, é variável de acordo com o cenário proposto. Assim, essa variável, apesar de também importante, é menos que as avaliadas anteriormente e será analisada de forma complementar às outras. A variabilidade de acordo com o cenário escolhido, além da possibilidade de utilização de estruturas portuárias diversas de acordo com disponibilidade e condições apresentadas, além da indefinição de condições concretas de obtenção de matéria-prima dificulta a exclusão de possíveis localizações baseando-se apenas no custo adicional de fretagem à zona portuária para implantação em municípios mais interiorizados.

De qualquer forma, é relevante destacar que municípios mais distantes de zonas portuárias importantes, como Pereira Barreto e Valparaíso, apresentam desvantagens em comparação a municípios com maior proximidade, como São Paulo (ou região metropolitana) e Araras. Essa diferença pode ser decisiva em um processo concreto de instalação da planta.

Todas as distâncias rodoviárias dos municípios citados como os principais candidatos nas Seções V.2.1 e V.2.2 até o município de Santos estão descritas na Tabela 10. As distâncias foram medidas com a ferramenta Maps do Google (acessível em <https://www.google.com.br/maps>).

Tabela 10 – Distâncias da capital e dos principais municípios produtores de etanol no estado de São Paulo até o município de Santos.

| MUNICÍPIO | DISTÂNCIA ATÉ MUNICÍPIO DE SANTOS (km) |
|---------------------|---|
| CIDADE DE SÃO PAULO | 73 |
| GUAIRA | 525 |
| PONTAL | 429 |
| PITANGUEIRAS | 443 |
| SERTÃOZINHO | 413 |
| BURITIZAL | 514 |
| MORRO AGUDO | 458 |

| | |
|----------------------|-----|
| VALPARAÍSO | 633 |
| PROMISSÃO | 525 |
| ARARAS | 250 |
| LUIS ANTÔNIO | 353 |
| PLANALTO | 589 |
| MONTE APRAZÍVEL | 552 |
| SÃO JOAQUIM DA BARRA | 460 |
| PEREIRA BARRETO | 726 |
| CATANDUVA | 465 |

V.1.4. Características Relevantes do Processo

Como descrito na Seção III, o processo tem expressiva característica de redução de massa, com coeficiente técnico de melaço igual a aproximadamente 4,86 toneladas de melaço para tonelada de PLA produzido. Além disso, o transporte do produto acabado é facilitado por ser disposta na forma de grão ou *pellets* em comparação à matéria-prima que é líquida.

Consequentemente, e como disposto por (BALLOU, 2007), é recomendável a instalação da planta em proximidade aos fornecedores melaço, ou seja, a indústria produtora de açúcar. A produção de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar pressupõe o transporte de maiores volumes de material líquido entre as plantas de açúcar e a planta de produção de PLA para processamento. Dessa forma, é extremamente vantajosa a proximidade com áreas produtoras de matéria-prima, a fim de reduzir ao máximo custos de transporte.

V.1.5. Localização

Vistos os principais pontos relevantes para a definição de localização da planta de PLA no Brasil, fica evidente a escolha do estado de São Paulo como ponto estratégico, não só pela adaptação de uma planta de produção de açúcar com geração de suficiente quantidade de melaço transportado de forma eficiente, mas pela facilidade de escoamento da produção para os principais potenciais consumidores internos e também externos do produto.

Além da definição genérica do estado de São Paulo, foram escolhidos 15 municípios com potencial para implantação, por se destacarem na produção de etanol, podendo indicar bom acesso a plantas de produção de açúcar, fundamental para a localização dada a característica de perda de massa no processo. Esses municípios, portanto, foram escolhidos de acordo com a capacidade instalada de produção de etanol e listadas na tabela 9.

Os municípios escolhidos ainda foram avaliados para proximidade com o possível posto de escoamento da produção para o mercado externo, na tentativa de analisar possíveis custos de transporte para exportação, e, conseqüentemente pontos positivos ou negativos de cada um. Nesse quesito, o município de Araras apresentou maior vantagem, enquanto Valparaíso e Pereira Barreto apresentaram as maiores potenciais desvantagens no transporte de produto para exportação.

Entretanto, sem detalhes concretos para adaptação de uma planta específica, a possibilidade da utilização de outras zonas portuárias por motivos diversos, além de fatores políticos, incentivos fiscais, aspectos ambientais (licenciamento ambiental), disponibilidade de terreno, entre outros, não é possível fazer uma escolha definitiva de localização.

Ainda assim, o objetivo desse estudo de localização foi atingido, possibilitando analisar sucintamente os principais fatores determinantes na localização de uma planta dessa natureza e eleger candidatos realistas a uma eventual realização de projeto, identificando vantagens e desvantagens de casos específicos.

V.2. Modelo de Negócios

Nessa seção, será descrito o modelo de negócios proposto para o projeto, de acordo com a metodologia Canvas, descrita na Seção II.4.

Para essa etapa, o negócio considerado foi a instalação de uma planta produtora de PLA a partir de melaço, de maneira integrada a uma planta produtora de açúcar no estado de São Paulo.

V.2.1. Proposta de Valor

O valor observado no projeto é a disponibilização, em território nacional, de resina plástica de PLA, criado a partir da valorização de subprodutos da cadeia de açúcar. O PLA, como material de origem renovável e biodegradável em condições de compostagem industrial, pode ser muito valorizado em mercados de nicho pela grande vantagem ambiental, tanto na redução da utilização de matérias-primas fósseis, quanto no potencial redução do problema do lixo plástico.

V.2.2. Parcerias Chave

As principais parcerias do projeto são relacionadas ao fornecimento de recursos ou serviços para a entrega da Proposta de Valor. A mais relevante é a escolha ou aceitação de uma planta produtora de açúcar para a adaptação do processo. Outras parcerias importantes incluem a compra de outras matérias-primas como ácido sulfúrico, hidróxido de cálcio, catalizadores e culturas bacterianas, além do licenciamento da tecnologia e a contratação de empresas para a construção da planta proposta.

V.2.3. Atividades Chave

As principais Atividades Chave são relacionadas à produção. A principal atividade para o presente projeto é a transformação de melaço de cana-de-açúcar em políácido láctico, a partir de processos fermentativos. Mas também são Atividades Chave a comercialização e entrega de PLA para os Segmentos de Clientes, o desenvolvimento de mercado e aplicações para o PLA no cenário brasileiro, bem como a construção da planta proposta.

V.2.4. Recursos Chave

Como descrito na Seção II.4, os recursos podem ser físicos, financeiros, intelectuais ou humanos. Dentre os recursos físicos estão, principalmente, a planta para produção e matérias-primas. Dentro os recursos financeiros está o capital necessário para construção, *start* e manutenção da planta de produção de PLA. Dentre os recursos intelectuais está a tecnologia necessária para

produção, que precisa ser licenciada. E dentro os recursos humanos está toda a mão-de-obra, especializada e não especializada, necessária tanto para a construção da planta, quanto para a operacionalização, além de administração, vendas, marketing, logística e entre outras áreas necessárias para a entrega do valor ao Segmento de Clientes.

V.2.5. Relacionamento com Clientes e Canais

Os elementos Relacionamento com Clientes e Canais são menos concretos para o projeto descrito nesse trabalho, com nenhuma forma previamente estabelecida de marketing e vendas. Entretanto, é possível estabelecer alguns pontos principais.

No elemento de Relacionamento com Clientes, é possível inferir que o principal esforço seria na aquisição de clientes, visto que no Brasil o mercado de PLA é insignificante, como descrito na seção V.1, e faz-se necessário desenvolver demanda nacional.

No elemento Canais, estabelece-se que o transporte do produto na forma peletizada ao consumidor será feito majoritariamente por meio rodoviária em caminhões via distribuidores ou de forma direta, tanto para a entrega nacional, quanto para o porto de exportação.

V.2.6. Segmento de Clientes

Esse projeto identifica dois principais Segmentos de Clientes. Como descrito na Seção V.1, a indústria de transformados plásticos nacional, em especial a indústria de embalagens é o principal alvo de comercialização do PLA produzido. Além disso, o projeto contempla o atendimento do mercado de exportação, porém sem tipo de indústria especificamente definida. Essa conclusão não descarta, porém, a venda para outros atores, principalmente com o desenvolvimento de novas aplicações como para impressão 3D e o uso cirúrgico.

V.2.7. Estrutura de Custos

Além do capital necessário para construção da planta, os custos recorrentes, fixos e variáveis, incluem administração, logística e distribuição, licenciamento tecnológico, mão-de-obra e matérias-primas, em especial ácido sulfúrico, carbonato de cálcio, catalisadores, cultura bacteriana e utilidades. Todos esses custos são descritos em detalhes na Seção VI.3, onde estão listadas as saídas dos fluxos de caixa previstos para o projeto.

V.2.8. Fontes de Receita

A única fonte de receita prevista para o projeto é a venda PLA para a indústria de transformados plásticos no Brasil e para exportação, de acordo com os cenários previamente estabelecidos na Seção V.1. As fontes de receita, bem como os valores projetados, são listadas em detalhe na Seção VI.2, referente às entradas dos fluxos de caixa previstos para o projeto.

Vale ressaltar, que no projeto proposto todo o ácido láctico produzido é exclusivamente destinado à produção de PLA e não comercializado.

V.2.9. Quadro de Modelo de Negócios Canvas

Figura 10 – Quadro do modelo de negócios Canvas.

| | | | | |
|--|---|---|--|---|
| Parcerias Chave <ul style="list-style-type: none"> • Indústria de açúcar • Licenciamento tecnológico • Indústria Química e Bioquímica para matérias-primas • Construtoras | Atividades Chave <ul style="list-style-type: none"> • Produção de PLA • Comercialização e entrega de PLA • Construção da planta | Proposta de Valor <ul style="list-style-type: none"> • PLA nacional • Origem renovável • Biodegradável • Reduz emissão de GEE • Reduz o problema do lixo plástico | Relacionamento com Clientes <ul style="list-style-type: none"> • Foco na captura de clientes | Segmento de Clientes <ul style="list-style-type: none"> • Indústria de transformados plásticos nacional • Exportação |
| | Recursos Chave <ul style="list-style-type: none"> • Matérias-primas • Capital • Tecnologia • Mão-de-obra | | Canais <ul style="list-style-type: none"> • Transporte rodoviário | |
| Estrutura de Custos <ul style="list-style-type: none"> • Compra de matérias-primas, licenciamento tecnológico, mão-de-obra, logística, distribuição, administração e construção da planta. | | | Fontes de Receita <ul style="list-style-type: none"> • Comercialização de PLA | |

V.3. Escala de Produção

A definição de uma escala de produção é essencial para a realização do estudo de viabilidade econômica, impactando diretamente em toda a estrutura de custos e receitas do projeto.

A escala escolhida para a presente análise foi para capacidade instalada de 16 000 toneladas ao ano de PLA. Essa escolha foi feita de forma a encontrar uma via intermediária entre as escalas utilizadas nas fontes de dados utilizadas para o processo de produção de ácido lático a partir de melaço de cana-de-açúcar e para produção de PLA a partir de ácido lático. Dessa forma, as escalas sofrem individualmente menores alterações, na tentativa de reduzir os erros gerados na estimativa do capital de investimento total.

Essa escala é compatível tanto com a produção a partir de subprodutos, o caso atual, quanto a escalas já utilizadas em outras plantas já estabelecidas, principalmente na China, com escalas próximas a 10 000 toneladas ao ano de PLA.

Para acomodar essa escolha, é necessário adaptar as escalas de produção de ambas as plantas/tecnologias dos artigos utilizados e descritos na Seção III.5. Faz-se necessária a produção de aproximadamente 40128 toneladas de ácido láctico para uma ocupação de 100%. Por esse motivo, a capacidade da planta descrita por Kwan, Hu, *et al.* (2018) foi aumentada em 1,5 vezes. Por outro lado, dados retirados de Mananhar e Shah (2020) para o processo de separação e purificação do ácido láctico foram extrapolados para 40% da capacidade instalada.

Com a definição arbitrária de uma escala para o estudo, o resultado permitirá inferir se uma planta com capacidade produtiva de 16 000 toneladas ao ano de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar é economicamente viável no Brasil.

VI. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

VI.1. Premissas

Como descrito por Ulrich (1984), o capital de giro para uma empresa na área de engenharia química é, em geral, entre 10% e 20% do investimento fixo. No projeto descrito por Kwan, Hu, *et al.* (2018) para uma planta produtora de PLA, o capital de giro necessário foi especificado como 15%. Visto que o valor de 15%, descrito por Kwan, Hu, *et al.* (2018), é compatível com os valores sugeridos pela literatura, e dada a similaridade do projeto com o projeto estudado, mesmo que com matéria-prima diversa, assumiu-se esse parâmetro como referência para o capital de giro da presente análise.

A curva de depreciação adotada foi a mesma utilizada por Kwan, Hu, *et al.* (2018), de 5% ao ano a partir do primeiro ano de operação. Por nenhuma das fontes de dados especificar a curva de investimento ou o tempo de construção das instalações, assumiu-se arbitrariamente um tempo de construção de 2 (dois) anos com 40% do investimento fixo gasto no ano 0 e 60% no ano 1 do projeto. Os fluxos de caixa foram calculados para 20 anos de operação, ou seja, até o ano 21.

A taxa de câmbio do dólar foi fixada em R\$ 5,00. Mesmo consideravelmente abaixo dos valores atuais, a expectativa do mercado é que o valor se aproxime

dos R\$ 5,00 por dólar e se estabilize nos próximos anos (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021).

A taxa mínima de atratividade (TMA) foi arbitrariamente indexada em 10%, o que garante um prêmio de 5,39% quando comparada à taxa de juros de longo prazo (TJLP) do BNDES (2021a) em maio de 2021. Mesmo comparada à taxa de longo prazo (TLP) do BNDES (2021b), definida como IPCA + 2,65%, a TMA adotada ainda antevê prêmio.⁵ A TMA ainda será submetida a análise de sensibilidade.

VI.2. Investimento Fixo

Como descrito na Seção III, o processo de produção escolhido é descrito em duas etapas: produção de ácido láctico e produção de PLA. Por esse motivo, o investimento fixo foi igualmente dividido entre os dois processos, de forma a tornar o processo mais intuitivo.

Os equipamentos principais necessários para a produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar foram obtidos nos processos descritos por Kwan, Hu, *et al.* (2018) e Manandhar e Shah (2020) (Tabela 11). Como descrito na Seção V.3, a planta de produção de ácido láctico a partir de melaço tem dados provenientes de mais de uma fonte a fim de minimizar o erro na mudança de escala com a utilização da 'regra de 0,6' descrita na Seção II.5. O processo descrito por Kwan, Hu, *et al.* (2018) utiliza processo de separação não convencional (extração por solvente) e extremamente caro para a realização da planta proposta. Assim, a principal fonte de dados e, conseqüentemente, equipamentos principais para a produção de ácido láctico foi o processo descrito por Manandhar e Shah (2020). Pelas diferenças nos processos, a atualização temporal, geográfica e de escala forma calculadas separadamente para cada equipamento e o valor total atualizado para os principais equipamentos foi igual a US\$ 16 325 492,04 (Tabela 11).

Como anteriormente estabelecido na Seção II.5, a atualização temporal do investimento fixo foi feita a partir dos índices disponibilizados pela INTRATEC

⁵ A partir de janeiro de 2018 o BNDES alterou a taxa utilizada em contratos firmados, passando da TJLP para a TLP. A TJPL continua sendo atualizada até o fim da vigência de todos os contratos firmados antes a 2018.

(2021) para os Estados Unidos. As datas originais dos dados colhidos eram 2018 e 2019, dependendo da fonte utilizada. O fator de atualização encontrado para os dados descritos por Manandhar e Shah (2020) foi de 1,03267, enquanto para os dados de Kwan, Hu, *et al.* (2018) foi igual a 1,08581.

Todos os outros componentes do investimento fixo da planta de produção de ácido láctico foram calculados a partir do custo atualizado dos equipamentos principais e convertidos para reais - totalizando R\$ 458 723 332,62 (Tabela 12).

Tabela 11 – Atualização de custo de equipamentos principais da planta de produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar.

| Equipamento | Custo Original por Equipamentos | Localização Original | Referência | Ano Original | Fator de Escala | Fator de Atualização | Fator de Localização |
|---|---------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| Shake Flask | US\$ 74 000,00 | Hong Kong | Kwan et al. (2018) | 2018 | 1,506 | 1,08581 | 1,2 |
| Seed Fermenter | US\$ 380 393,00 | Hong Kong | Kwan et al. (2018) | 2018 | 1,506 | 1,08581 | 1,2 |
| Seed Fermenter | US\$ 1 019 218,00 | Hong Kong | Kwan et al. (2018) | 2018 | 1,506 | 1,08581 | 1,2 |
| Seed Fermenter | US\$ 1 412 218,00 | Hong Kong | Kwan et al. (2018) | 2018 | 1,506 | 1,08581 | 1,2 |
| Fermentadores | US\$ 5 163 206,00 | Hong Kong | Kwan et al. (2018) | 2018 | 1,506 | 1,08581 | 1,2 |
| Tanque de Estocagem | US\$ 354 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Tanque de Neutralização | US\$ 201 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Tanque de Remoção de Gesso | US\$ 520 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Secador | US\$ 51 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Coluna de Destilação | US\$ 1 923 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Coluna de Destilação | US\$ 728 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Reator de Esterificação | US\$ 180 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| Reator de Hidrólise | US\$ 114 000,00 | Estados Unidos | Manandhar e Shah (2019) | 2019 | 0,401 | 1,03267 | 1,2 |
| TOTAL DE EQUIPAMENTOS ATUALIZADO | US\$ 16 325 492,04 | | | | | | |

Tabela 12 – Atualização do investimento fixo da planta de produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar.

| Equipamento | Custo Original por Equipamentos | Cálculo | Referência Utilizadas para Cálculo |
|-----------------------|---------------------------------|---------|------------------------------------|
| Custos Diretos | | | |

| | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Equipamentos Atualizados | US\$ 16 325 492,04 | | |
| Instalação | US\$ 9 174 466,65 | 10% do Investimento Fixo | Peter e Timmerhaus (1991) |
| Tubulações | US\$ 5 713 922,21 | 35% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Instrumentação | US\$ 6 530 196,82 | 40% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Elétrica | US\$ 1 632 549,20 | 10% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Prédios | US\$ 7 346 471,42 | 45% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Área Externa | US\$ 2 448 823,81 | 15% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Instalações de Serviço | US\$ 6 530 196,82 | 40% de Equipamentos | Manandhar e Shah (2020) |
| Custos Indiretos | | | |
| Engenharia e Supervisão | US\$ 11 140 423,79 | 20% dos Custos Diretos | Manandhar e Shah (2020) |
| Construção | US\$ 11 140 423,79 | 20% dos Custos Diretos | Manandhar e Shah (2020) |
| Construtora | US\$ 4 587 233,33 | 5% de Custos Diretos e Indiretos | Manandhar e Shah (2020) |
| Contingência | US\$ 9 174 466,65 | 10% de Custos Diretos e Indiretos | Manandhar e Shah (2020) |
| INVESTIMENTO FIXO EM DÓLARES | US\$ 91 744 666,52 | | |
| Dólar | 5,0 | | |
| INVESTIMENTO FIXO EM REAIS | R\$ 458 723 332,62 | | |

Por outro lado, o processo de produção de PLA a partir de ácido láctico descrito por Kwan, Hu, *et al.* (2018) foi utilizado de forma integral. Os custos com equipamentos principais, bem como todos os componentes do investimento fixo e atualizações pertinentes estão descritos na Tabela 13. O investimento total necessário para a parte da planta produtora de PLA foi R\$ 143 126 977,09.

Assim, o investimento fixo total necessário para a planta proposta foi estimado em R\$ 601 850 309,71 (Tabela 14).

Ainda é relevante descrever a curva de investimento utilizada. Por falta de dados nas principais fontes de dados utilizadas, a curva de investimento foi arbitrariamente definida como 40% no Ano 0 e 60% no Ano 1.

Tabela 13 – Atualização do investimento fixo da planta de produção de PLA a partir de ácido láctico. As porcentagens utilizadas para cálculo dos itens foram adaptadas de Kwan, Hu, *et al.* (2018).

| Equipamento | Custo Original por Equipamentos | Cálculo ou Referência |
|-----------------------------------|--|------------------------------|
| Reator Agitado | US\$ 103 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Filtro | US\$ 154 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Cristalizador | US\$ 841 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Condensador | US\$ 34 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Bandeja Secadora | US\$ 508 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Reator Agitado | US\$ 723 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Filtração | US\$ 432 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Bandeja Secadora | US\$ 301 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| Coluna de Destilação | US\$ 937 000,00 | Kwan et al. (2018) |
| TOTAL DE EQUIPAMENTOS | US\$ 4 033 000,00 | |
| Instalação | US\$ 1 374 350,00 | Kwan et al. (2018) |
| Tubulações | US\$ 1 250 230,00 | 31% de Equipamentos |
| Instrumentação | US\$ 1 734 190,00 | 43% de Equipamentos |
| Elétrica | US\$ 403 300,00 | 10% de Equipamentos |
| Prédios | US\$ 604 950,00 | 15% de Equipamentos |
| Área Externa | US\$ 483 960,00 | 12% de Equipamentos |
| Instalações de Serviço | US\$ 2 218 150,00 | 55% de Equipamentos |
| Engenharia e Supervisão | US\$ 1 290 560,00 | 32% de Equipamentos |
| Construção | US\$ 1 371 220,00 | 34% de Equipamentos |
| Despesas Legais | US\$ 161 320,00 | 4% de Equipamentos |
| Construtora | US\$ 766 270,00 | 19% de Equipamentos |
| Contingência | US\$ 1 492 210,00 | 37% de Equipamentos |
| INVESTIMENTO FIXO ORIGINAL | US\$ 17 193 710,00 | |
| Localização Original | Hong Kong | Kwan et al. (2018) |
| Localização Atualizada | Brasil | |
| Fator de Atualização | 1,2 | |
| Ano Original | 2018 | Kwan et al. (2018) |

| | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Ano Atualizado | 2021 | |
| Fator de Atualização | 1,08581 | |
| Escala Original | 10 624 ton/ano | Kwan et al. (2018) |
| Escala Atualizada | 15 936 ton/ano | |
| Fator de Escala | 1,506 | |
| Dólar | 5,0 | |
| <hr/> | | |
| INVESTIMENTO FIXO ATUALIZADO | R\$ 143 126 977,09 | |
| <hr/> | | |

Tabela 14 – Atualização do investimento fixo de acordo com a escala e localização.

| Planta | Investimento Fixo na Escala Original (R\$) |
|------------------|---|
| Ácido Lático | 458 723 332,62 |
| Poliácido Lático | 143 126 977,09 |
| TOTAL | 601 850 309,71 |

Além disso, percebe-se que as porcentagens descritas por Manandhar, Shah (2020) e Kwan, Hu, *et al.* (2018) para o investimento fixo das duas etapas de produção descritas são compatíveis com os valores listados por Peters e Timmerhaus (1991) e descrito na seção de metodologia. As porcentagens do investimento fixo total de cada item para os dois processos estão listadas nas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Porcentagens do investimento fixo para custos diretos e indiretos para a planta descrita por Manandhar e Shah (2020).

| Item | Percentual do Total (%) |
|---------------------------|--------------------------------|
| Custos Diretos | |
| Compra de Equipamentos | 17,79 |
| Instalação | 10,00 |
| Instrumentação e Controle | 7,12 |
| Tubulações | 6,23 |
| Elétrica | 1,78 |
| Construções | 8,01 |
| Área Externa | 2,67 |

| | |
|-------------------------|-------|
| Instalações de Serviço | 7,12 |
| Custos Indiretos | |
| Engenharia e Supervisão | 12,14 |
| Despesas de Construção | 12,14 |
| Construtora | 5,00 |
| Contingência | 10,00 |

Tabela 16 – Porcentagens do investimento fixo para custos diretos e indiretos para a planta descrita por Kwan, Hu, *et al.* (2018).

| Item | Percentual do Total (%) |
|---------------------------|----------------------------|
| Custos Diretos | |
| Compra de Equipamentos | 23,47 |
| Instalação | Específico por Equipamento |
| Instrumentação e Controle | 10,09 |
| Tubulações | 7,28 |
| Elétrica | 2,35 |
| Construções | 3,52 |
| Área Externa | 2,38 |
| Instalações de Serviço | 12,91 |
| Custos Indiretos | |
| Engenharia e Supervisão | 7,51 |
| Despesas de Construção | 7,98 |
| Despesas Legais | 0,94 |
| Construtora | 4,46 |
| Contingência | 8,68 |

VI.3. Estrutura de Custos

Pelas diferentes fontes utilizadas para a estimação de custos para a planta de produção de ácido láctico e para a planta de produção de PLA a partir de ácido láctico, cada etapa da estimação de custo será apresentada separadamente para cada etapa.

VI.3.1. Matérias-Primas

O custo de cada matéria-prima no Brasil foi encontrado, quando possível, em fontes online. Para algumas matérias-primas com alta especificidade e com informações não disponíveis, foram adotados os valores declarados para a localização original da planta, é o caso, por exemplo, da nanopartícula de óxido de zinco, agente catalizador da polimerização. As matérias-primas já importadas ou exportadas em grande quantidade, puderam ter preços médios aferidos por meio da plataforma de comércio exterior do Ministério da Economia (Comex Stat), e foram definidos como a média de preço por tonelada nos últimos 10 anos com movimentação superior a 1000 toneladas.

Os coeficientes técnicos para a produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 17, bem como preços por tonelada e totais. As principais matérias-primas para a produção de ácido láctico são melaço, hidróxido de cálcio, ácido sulfúrico, metanol, cultura bacteriana e nutrientes.

Vale ressaltar, que pela natureza integrada do processo com a produção de açúcar, considerou-se o custo do melaço igual a zero. Entretanto, serão ainda consideradas e analisadas as perdas de receita sem a venda de melaço.

Tabela 17 – Coeficientes técnicos e custos de matérias-primas para produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar – para ocupação igual a 100%.

| Matéria-Prima | Coeficiente Técnico | Referência do Coeficiente Técnico | Custo | | Total |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | | | Unitário (por tonelada) | Referência do Custo Unitário | |
| Melaço | 1,92 | Manandhar e Shah (2020) | - | - | - |
| Hidróxido de Cálcio | 0,41269841 | Ministério da Economia (2021) | US\$ 90,27 | Ministério da Economia (2021) | US\$ 1 494 939,98 |
| Ácido Sulfúrico | 0,53968254 | | US\$ 44,84 | | US\$ 971 072,12 |
| Metanol | 0,00793651 | | US\$ 343,09 | | US\$ 109 266,00 |
| Cultura e Nutrientes | 0,02619048 | Manandhar e Shah (2020) | US\$ 150,00 | Manandhar e Shah (2020) | US\$ 157 645,71 |
| TOTAL EM DÓLARES | | | | | US\$ 2 732 923,81 |
| TOTAL EM REAIS | | | | | R\$ 13 664 619,05 |

Para a etapa de produção de PLA a partir de ácido láctico, os coeficientes técnicos, preços por tonelada e totais estão listados na Tabela 18. As principais matérias-primas para a produção de PLA são ácido láctico, acetato de etila, *polyglyceryl-10*, clorofórmio, metanol e catalisadores octoato de estanho e nanopartícula de óxido de zinco.

Destaca-se ainda, que nessa etapa o ácido láctico é contabilizado com custo zero por ser produzido na etapa anterior.

Tabela 18 – Coeficientes técnicos e custos de matérias-primas para produção de PLA a partir de ácido láctico – para ocupação igual a 100%.

| Matéria-Prima | Coeficiente Técnico | Referência do Coeficiente Técnico | Custo Unitário (por tonelada) | Referência do Custo Unitário | Total |
|---------------------------------|----------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Ácido Láctico | 2,508 | | - | - | - |
| Acetato de Etila | 0,078306669 | | US\$ 945,91 | Ministério da Economia (2021) | US\$ 1 185 136,99 |
| Polyglyceryl-10 | 0,00078125 | | US\$ 264,00 | Kwan et al. (2018) | US\$ 3 300,00 |
| Nanopartícula de Óxido de Zinco | 0,005939844 | Kwan et al. (2018) | US\$ 20 000,00 | Kwan et al. (2018) | US\$ 1 900 750,00 |
| Octoato de Estanho | 0,001640625 | | US\$ 8 200,00 | Alibaba, 2021a | US\$ 215 250,00 |
| Clorofórmio | 0,078285064 | | US\$ 581,00 | Kwan et al. (2018) | US\$ 727 737,95 |
| Metanol | 0,125255083 | | US\$ 343,09 | Ministério da Economia (2021) | US\$ 687 580,26 |
| TOTAL EM DÓLARES | | | | | US\$ 4 719 755,20 |
| TOTAL EM REAIS | | | | | R\$ 23 598 776,01 |

VI.3.2. Custos Variáveis

Os custos variáveis apresentam dois componentes: os custos de matérias-primas principais e os custos de utilidades. Os custos de matérias-primas já foram apresentados anteriormente na Seção VI.3.1.

O custo com utilidades de uma planta é estimado por Peters e Timmerhaus (1991) como 15% do custo total de produção (Tabela 19). Esse parâmetro foi, portanto, calculado em conjunto com os custos fixos, mas é apresentado nessa seção por conveniência.

Tabela 19 – Composição do custo variável para a produção de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar para uma ocupação teórica de 100%.

| Componente do Custo Variável | Valor (US\$) | Valor (R\$) |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Melaço - Ácido Láctico | | |
| Matéria-Prima | US\$ 2 732 923,81 | R\$ 13 664 619,05 |
| Utilidades | US\$ 5 018 673,98 | R\$ 25 093 369,91 |
| TOTAL | US\$ 7 751 597,79 | R\$ 38 757 988,96 |
| Ácido Láctico PLA | | |
| Matéria-Prima | US\$ 4 719 755,20 | R\$ 23 598 776,01 |
| Utilidades | US\$ 2 129 421,76 | R\$ 10 647 108,78 |
| TOTAL | US\$ 6 849 176,96 | R\$ 34 245 884,79 |
| CUSTO VARIÁVEL TOTAL | US\$ 14 600 774,80 | R\$ 73 003 873,80 |

VI.3.3. Custos Fixos

Os custos fixos tanto para a produção de ácido láctico a partir de melaço quanto para a produção de PLA a partir de ácido láctico foram calculados com base dos parâmetros descritos por Kwan, Hu, *et al.* (2018), Manandhar e Shah (2020), Peters e Timmerhaus (1991) e Towler e Sinnott (2013).

As relações descritas por Kwan, Hu, *et al.* (2018) e Manandhar e Shah (2020) foram tomadas como preferenciais por serem originalmente para um processos de produção de ácido láctico e PLA. As relações apresentadas por Peters e Timmerhaus (1991) e Towler e Sinnott (2013) foram utilizadas na falta de relações mais específicas, por serem generalizações à indústria química.

Dados de número de operadores para a planta de produção de ácido láctico a partir de melaço de cana-de-açúcar não foram encontrados, por esse motivo utilizou-se a correlação descritas por Peters e Timmerhaus (1991), ou seja, 10% do custo total de operação.

Por outro lado, para a produção de PLA a partir de ácido láctico são necessários 12 operadores. De acordo com dados da ABIQUIM (2018), o salário médio na indústria química brasileira era de US\$ 2.453,00 por mês no ano de

2017. Para conversão dos dados ao real, utilizou-se a cotação do dólar média do ano de 2017, igual a R\$3,1920 (IPEA, 2021). Para correção temporal, foi utilizado o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) de janeiro de 2018 a janeiro de 2021, totalizando 13,38% (IBGE, 2021a). Dessa maneira, o valor do salário mensal por trabalhador foi igual a R\$ 8877,63 ou R\$ 106 531,52 ao ano.

Em relação aos encargos trabalhistas, segundo documento produzido para o Senado Federal por Cavalcante (2020), para um salário hipotético de R\$100,00, o desembolso total do empregador é de R\$153,80. Assim, os encargos trabalhistas foram contabilizados como 53,80% do salário nominal supracitado. Conseqüentemente, o total desembolsado por trabalhador de operação foi estimado em R\$ 163 845,54 ao ano.

Todos os custos fixos, formas de cálculo e referências pertinentes estão listados na Tabela 20 para a etapa de produção de ácido láctico e Tabela 21 para a etapa de produção de PLA. Os componentes dos custos operacionais foram calculados conforme descrito na seção de metodologia. Entretanto, os gastos com pesquisa e desenvolvimento, por serem unicamente dependentes da receita, foram incluídos por conveniência apenas na Tabela 21 e representam todo o gasto nessa área.

O custo fixo total para a projeto é descrito na Tabela 22. Os custos fixos ainda podem ser divididos em custos de produção, aqueles diretamente ligados à produção do PLA, e outros custos operacionais.

Na Figura 11, são demonstrados os percentuais de cada um dos elementos componentes do custo fixo. Percebe-se que os quatro componentes mais relevantes são Manutenção (25,49%), Custos de Gerenciamento da Planta (19,25%), Licenciamento e Royalties (14,57%) e Mão-de-Obra (13,01%).

Tabela 20 – Custo fixo para produção de ácido láctico a partir de melação de cana-de-açúcar.

| Elemento do Custo Fixo | Método de Cálculo | Referência | Custo |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Mão-de-Obra Total | - | - | US\$ 3 847 650,05 |
| • <i>Mão-de-Obra de Operação</i> | <i>10% do Custo Total de Operação</i> | <i>Peter e Timmerhaus (1991)</i> | <i>US\$ 3 345 782,66</i> |
| • <i>Supervisão</i> | <i>15% da Mão-de-Obra de Operação</i> | <i>Kwan et al. (2018)</i> | <i>US\$ 501 867,40</i> |
| Manutenção | 7% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 6 422 126,66 |

| | | | |
|--|---|--------------------------------|---------------------------|
| Licenciamento e Royalties | 4% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 3 669 786,66 |
| Laboratório | 15% da Mão-de-Obra Total | Kwan et al. (2018) | US\$ 577 147,51 |
| Operating Supplies | 15% de Manutenção | Kwan et al. (2018) | US\$ 963 319,00 |
| Seguro | 1% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 917 446,67 |
| Custos de Gerenciamento da Planta | 5% de Mão-de-Obra Total + Manutenção | Kwan et al. (2018) | US\$ 5 134 888,36 |
| Custos Operacionais (Total) | - | - | US\$ 4 173 863,86 |
| • <i>Administração</i> | <i>65% da Mão-de-Obra Total</i> | <i>Towler e Sinnott (2013)</i> | US\$ 2 500 972,53 |
| • <i>Distribuição e Marketing</i> | <i>5% do Custo Total de Produção</i> | <i>Towler e Sinnott (2013)</i> | US\$ 1 672 891,33 |
| TOTAL EM DÓLARES | | | US\$ 25 706 228,76 |
| TOTAL EM REAIS | | | R\$ 128 531 143,80 |

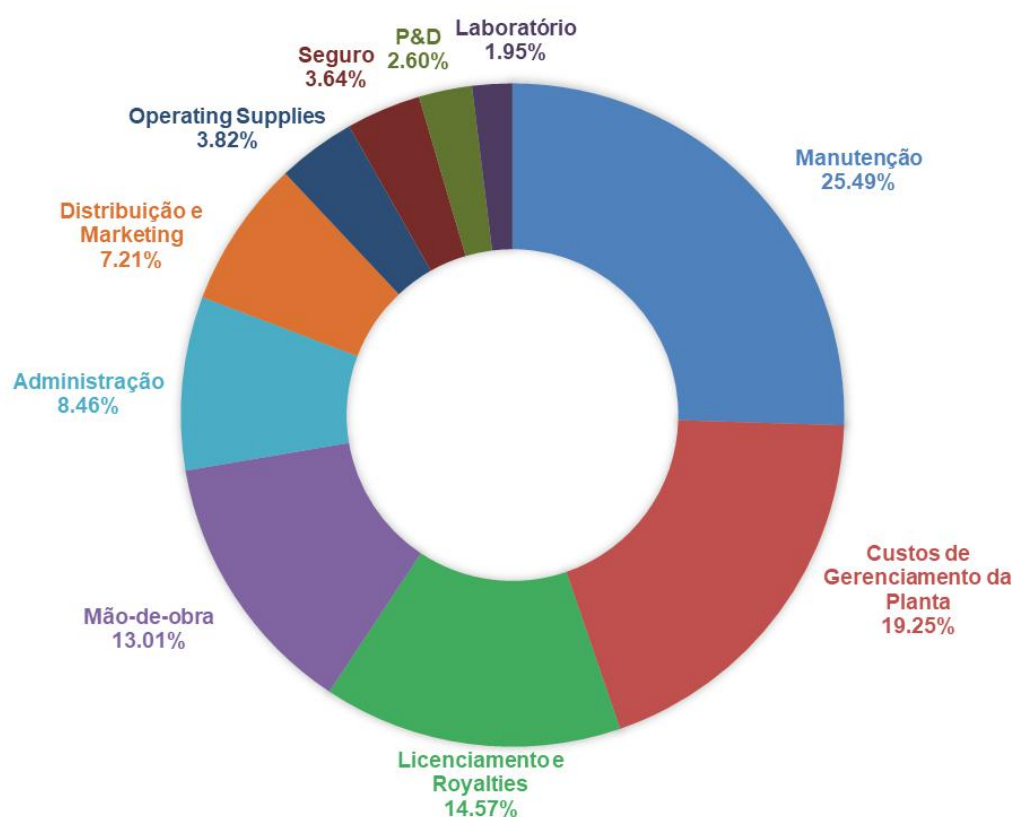
Tabela 21 – Custo fixo para produção PLA a partir de ácido láctico.

| Elemento do Custo Fixo | Método de Cálculo | Referência | Custo |
|--|---|--------------------------------|--------------------------|
| Mão-de-Obra Total | - | - | US\$ 452 213,69 |
| • <i>Mão-de-Obra de Operação</i> | <i>12 Operadores</i> | <i>Kwan et al. (2018)</i> | <i>US\$ 393 229,30</i> |
| • <i>Supervisão</i> | <i>15% da Mão-de-Obra de Operação</i> | <i>Kwan et al. (2018)</i> | <i>US\$ 58 984,39</i> |
| Manutenção | 7% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 2 003 777,68 |
| Licenciamento e Royalties | 4% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 1 145 015,82 |
| Laboratório | 15% da Mão-de-Obra Total | Kwan et al. (2018) | US\$ 67 832,05 |
| Operating Supplies | 15% de Manutenção | Kwan et al. (2018) | US\$ 300 566,65 |
| Seguro | 1% do Investimento Fixo | Kwan et al. (2018) | US\$ 286 253,95 |
| Custos de Gerenciamento da Planta | 5% de Mão-de-Obra Total + Manutenção | Kwan et al. (2018) | US\$ 1 227 995,68 |
| Custos Operacionais (Total) | - | - | US\$ 1 863 312,55 |
| • <i>Administração</i> | <i>65% da Mão-de-Obra Total</i> | <i>Towler e Sinnott (2013)</i> | <i>US\$ 293 938,90</i> |
| • <i>Distribuição e Marketing</i> | <i>5% do Custo Total de Operação</i> | <i>Towler e Sinnott (2013)</i> | <i>US\$ 709 807,25</i> |
| • <i>P&D</i> | <i>1% da Receita Máxima</i> | <i>Towler e Sinnott (2013)</i> | <i>US\$ 859 566,40</i> |
| TOTAL EM DÓLARES | | | US\$ 7 346 968,08 |
| TOTAL EM REAIS | | | R\$ 36 734 840,41 |

Tabela 22 – Custo fixo para a produção de PLA a partir de melaço de cana-de-açúcar.

| Componente do Custo Variável | Valor (US\$) | Valor (R\$) |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Custo Fixo de Produção | US\$ 27 016 020,43 | R\$ 135 080 102,14 |
| Custo Operacional | US\$ 6 037 176,41 | R\$ 30 185 882,07 |
| CUSTO FIXO TOTAL | US\$ 33 053 196,84 | R\$ 165 265 984,21 |

Figura 11 – Percentuais representativos dos elementos componentes do custo fixo.



VI.4. Receitas

A única fonte de receita proposta é a venda de PLA. Dessa maneira, a receita do projeto depende apenas do preço de venda do poliácido láctico e da ocupação no ano.

Como descrito na Seção IV.2, o preço de venda de PLA adotado para o cenário base é igual a US\$ 5 372,29. A curva de ocupação proposta começa em 70% no ano 2, subindo 5 p.p. ao ano até um máximo de 95% no ano 7. Assim, foram listadas as receitas esperadas do ano 0 ao 21 na Tabela 23.

Tabela 23 – Receita total esperada para todos os fluxos de caixa do projeto estudado.

| Ano | Ocupação | Preço de Venda | Total |
|--------|----------|----------------|---------------------------|
| 0 - 1 | 0% | US\$ 5 372,29 | - |
| 2 | 70% | US\$ 5 372,29 | R\$ 300 848 240,00 |
| 3 | 75% | US\$ 5 372,29 | R\$ 322 337 400,00 |
| 4 | 80% | US\$ 5 372,29 | R\$ 343 826 560,00 |
| 5 | 85% | US\$ 5 372,29 | R\$ 365 315 720,00 |
| 6 | 90% | US\$ 5 372,29 | R\$ 386 804 880,00 |
| 7 - 21 | 95% | US\$ 5 372,29 | R\$ 408 294 040,00 |

VI.5. DRE e Fluxos de Caixa

A partir dos dados apresentados e das premissas construídas nas seções anteriores, foi possível analisar os aspectos econômicos do projeto a partir da construção das demonstrações de resultado do exercício (DRE) e dos fluxos de caixa.

Os DRE para os anos 2 a 21 estão descritos nas Tabelas 24, 25 e 26. Esses resultados são necessários para estimar o imposto de renda do projeto. Por vez, os fluxos de caixa estão contidos nas Tabelas 27, 28 e 29.

Com a TMA estabelecida em 10%, o VPL encontrado foi positivo e igual a R\$ 198 020 088,43. A TIR do projeto para o cenário base foi de aproximadamente 13,52%. (Tabelas 27, 28 e 29)

Tabela 24 – Demonstrações de resultado do exercício do ano 2 ao 8.

| Ano | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Receita Líquida de Vendas | R\$ 300 848 240,00 | R\$ 322 337 400,00 | R\$ 343 826 560,00 | R\$ 365 315 720,00 | R\$ 386 804 880,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Custos Variáveis | R\$ 51 102 711,62 | R\$ 54 752 905,31 | R\$ 58 403 099,00 | R\$ 62 053 292,69 | R\$ 65 703 486,37 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| Custos Fixos Desembolsáveis | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Lucro Operacional Bruto | R\$ 114 665 426,24 | R\$ 132 504 392,55 | R\$ 150 343 358,86 | R\$ 168 182 325,17 | R\$ 186 021 291,49 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Lucro Operacional | R\$ 84 479 544,17 | R\$ 102 318 510,48 | R\$ 120 157 476,79 | R\$ 137 996 443,10 | R\$ 155 835 409,42 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - |
| Depreciação | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 | R\$ 30 092 515,49 |
| Lucro antes do IR | R\$ 54 387 028,68 | R\$ 72 225 994,99 | R\$ 90 064 961,31 | R\$ 107 903 927,62 | R\$ 125 742 893,93 | R\$ 143 581 860,24 | R\$ 143 581 860,24 |
| IR | R\$ 18 491 589,75 | R\$ 24 556 838,30 | R\$ 30 622 086,84 | R\$ 36 687 335,39 | R\$ 42 752 583,94 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 |
| Lucro Depois do IR | R\$ 35 895 438,93 | R\$ 47 669 156,70 | R\$ 59 442 874,46 | R\$ 71 216 592,23 | R\$ 82 990 309,99 | R\$ 94 764 027,76 | R\$ 94 764 027,76 |

Tabela 25 – Demonstrações de resultado do exercício do ano 8 ao 15.

| Ano | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Receita Líquida de Vendas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Custos Variáveis | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| Custos Fixos Desembolsáveis | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Lucro Operacional Bruto | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 | R\$ 203 860 257,80 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Lucro Operacional | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 | R\$ 173 674 375,73 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - |

Tabela 27 – Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melão) do ano 0 ao 7.

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | - | - | R\$ 300 848 240,00 | R\$ 322 337 400,00 | R\$ 343 826 560,00 | R\$ 365 315 720,00 | R\$ 386 804 880,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | - | - | R\$ 300 848 240,00 | R\$ 322 337 400,00 | R\$ 343 826 560,00 | R\$ 365 315 720,00 | R\$ 386 804 880,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Saídas | | | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | | | |
| - Custo Variável | - | - | R\$ 51 102 711,62 | R\$ 54 752 905,31 | R\$ 58 403 099,00 | R\$ 62 053 292,69 | R\$ 65 703 486,37 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | - | - | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | - | - | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | | | |
| - Investimento Fixo | R\$ 240 740 123,88 | R\$ 361 110 185,82 | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | R\$ 90 277 546,46 | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | - | - | R\$ 18 491 589,75 | R\$ 24 556 838,30 | R\$ 30 622 086,84 | R\$ 36 687 335,39 | R\$ 42 752 583,94 | R\$ 48 817 832,48 |
| Total Saídas | R\$ 240 740 123,889 | R\$ 451 387 732,28 | R\$ 234 860 285,59 | R\$ 244 575 727,82 | R\$ 254 291 170,05 | R\$ 264 006 612,29 | R\$ 273 722 054,52 | R\$ 283 437 496,75 |
| TOTAL | - R\$ 240 740 123,88 | - R\$ 451 387 732,28 | R\$ 65 987 954,41 | R\$ 77 761 672,18 | R\$ 89 535 389,95 | R\$ 101 309 107,71 | R\$ 113 082 825,48 | R\$ 124 856 543,25 |
| TMA | 10% | | | | | | | |
| Valor Presente | - R\$ 240 740 123,88 | - R\$ 410 352 483,89 | R\$ 54 535 499,52 | R\$ 58 423 495,25 | R\$ 61 153 876,06 | R\$ 62 904 985,20 | R\$ 63 832 306,92 | R\$ 64 071 148,78 |
| VPL (Total) | R\$ 198 020 088,43 | | | | | | | |
| TIR (Total) | 13,517715% | | | | | | | |

Tabela 28 – Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melação) do ano 8 ao 15.

| Ano | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Saídas | | | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | | | |
| - Custo Variável | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | | | |
| - Investimento Fixo | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 |
| Total Saídas | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 |
| TOTAL | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 |
| TMA | 10% | | | | | | | |
| Valor Presente | R\$ 58 246 498,89 | R\$ 52 951 362,63 | R\$ 48 137 602,39 | R\$ 43 761 456,72 | R\$ 39 783 142,47 | R\$ 36 166 493,16 | R\$ 32 878 630,14 | R\$ 29 889 663,76 |
| VPL (Total) | R\$ 198 020 088,43 | | | | | | | |
| TIR (Total) | 13,517715% | | | | | | | |

Tabela 29 – Fluxos de caixa para o cenário base (sem desconto de melão) do ano 16 ao 21.

| Ano | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | R\$ 90 277 546,46 |
| Total Entradas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Saídas | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | |
| - Custo Variável | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | |
| - Investimento Fixo | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 |
| Total Saídas | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 | R\$ 283 437 496,75 |
| TOTAL | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 124 856 543,25 | R\$ 215 134 089,70 |
| TMA | 10% | | | | | |
| Valor Presente | R\$ 27 172 421,60 | R\$ 24 702 201,46 | R\$ 22 456 546,78 | R\$ 20 415 042,53 | R\$ 18 559 129,57 | R\$ 29 071 192,37 |
| VPL (Total) | R\$ 198 020 088,43 | | | | | |
| TIR (Total) | 13,517715% | | | | | |

VI.6. Fluxos de Caixa com Compensação de Perda de Receita

Uma outra maneira de avaliar o projeto é a compensação da perda de receita com a venda do melaço utilizado no processo. Para isso, considerou-se a receita perdida como uma saída complementar na construção dos fluxos de caixa.

A massa de melaço utilizada foi calculada a partir do coeficiente técnico descrito na Seção VI.3 e, para uma ocupação de 100%, é igual a 77045,8 toneladas/ano. O preço de venda do melaço foi estimado a partir de dados de exportação brasileira em US\$ 146,20 (MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL, 2021).

Assim, os fluxos de caixa com compensação de perda de receita pela venda do melaço utilizado no processo estão descritos nas Tabelas 30, 31 e 32.

Nessa situação, a TIR foi igual a 6,32% e o VPL encontrado foi – R\$ 185 126 857,35. Ou seja, se considerada a perda de receita de melaço, o projeto não atinge a atratividade mínima esperada de 10% (Tabelas 30, 31 e 32).

Tabela 30 – Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 0 ao 7.

| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | - | - | R\$ 300 848 240,00 | R\$ 322 337 400,00 | R\$ 343 826 560,00 | R\$ 365 315 720,00 | R\$ 386 804 880,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | - | - | R\$ 300 848 240,00 | R\$ 322 337 400,00 | R\$ 343 826 560,00 | R\$ 365 315 720,00 | R\$ 386 804 880,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Saídas | | | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | | | |
| - Custo Variável | - | - | R\$ 51 102 711,62 | R\$ 54 752 905,31 | R\$ 58 403 099,00 | R\$ 62 053 292,69 | R\$ 65 703 486,37 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | - | - | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | - | - | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | | | |
| - Investimento Fixo | R\$ 240 740 123,88 | R\$ 361 110 185,82 | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | R\$ 90 277 546,46 | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | - | - | R\$ 18 491 589,75 | R\$ 24 556 838,30 | R\$ 30 622 086,84 | R\$ 36 687 335,39 | R\$ 42 752 583,94 | R\$ 48 817 832,48 |
| Perda de Receita de Melão | - | - | R\$ 39 424 315,39 | R\$ 42 240 337,92 | R\$ 45 056 360,45 | R\$ 47 872 382,98 | R\$ 50 688 405,50 | R\$ 53 504 428,03 |
| Total Saídas | R\$ 240 740 123,88 | R\$ 451 387 732,28 | R\$ 274 284 600,98 | R\$ 286 816 065,74 | R\$ 299 347 530,50 | R\$ 311 878 995,26 | R\$ 324 410 460,02 | R\$ 336 941 924,79 |
| TOTAL | -R\$ 240 740 123,88 | -R\$ 451 387 732,28 | R\$ 26 563 639,02 | R\$ 35 521 334,26 | R\$ 44.479.029,50 | R\$ 53 436 724,74 | R\$ 62 394 419,98 | R\$ 71 352 115,21 |
| TMA | 10% | | | | | | | |
| Valor Presente | -R\$ 240 740 123,88 | -R\$ 410 352 483,89 | R\$ 21 953 420,68 | R\$ 26 687 704,18 | R\$ 30 379 775,63 | R\$ 33 180 001,82 | R\$ 35 220 023,46 | R\$ 36 614 917,17 |
| VPL (Total) | -R\$ 185.126.857,35 | | | | | | | |
| TIR (Total) | 6,318863% | | | | | | | |

Tabela 31 – Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 8 ao 15.

| Ano | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Saídas | | | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | | | |
| - Custo Variável | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | | | |
| - Investimento Fixo | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 |
| Perda de Receita de Melão | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 |
| Total Saídas | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 |
| TOTAL | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 |
| TMA | 10% | | | | | | | |
| Valor Presente | R\$ 33 286 288,34 | R\$ 30 260 262,13 | R\$ 27 509 329,21 | R\$ 25 008 481,10 | R\$ 22 734 982,82 | R\$ 20 668 166,20 | R\$ 18 789 242,00 | R\$ 17 081 129,09 |
| VPL (Total) | -R\$ 185.126.857,35 | | | | | | | |
| TIR (Total) | 6,318863% | | | | | | | |

Tabela 32 – Fluxos de caixa para o cenário base com compensação de perda de receita do ano 16 ao 21.

| Ano | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Entradas | | | | | | |
| Receitas Operacionais Líquidas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 |
| Refeitas Financeiras | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro Recuperado | - | - | - | - | - | R\$ 90 277 546,46 |
| Total Entradas | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 408 294 040,00 | R\$ 498 571 586,46 |
| Saídas | | | | | | |
| Custo de Produção | | | | | | |
| - Custo Variável | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 | R\$ 69 353 680,06 |
| - Custo Fixo | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 | R\$ 135 080 102,14 |
| Despesas Operacionais | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 | R\$ 30 185 882,07 |
| Despesas Financeiras | - | - | - | - | - | - |
| Investimento Total | | | | | | |
| - Investimento Fixo | - | - | - | - | - | - |
| - Capital de Giro | - | - | - | - | - | - |
| Impostos | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 | R\$ 48 817 832,48 |
| Perda de Receita de Melaço | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 | R\$ 53 504 428,03 |
| Total Saídas | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 | R\$ 336 941 924,79 |
| TOTAL | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 71 352 115,21 | R\$ 161 629 661,67 |
| TMA | 10% | | | | | |
| Valor Presente | R\$ 15 528 299,17 | R\$ 14 116 635,61 | R\$ 12 833 305,10 | R\$ 11 666 641,00 | R\$ 10 606 037,27 | R\$ 21 841 108,46 |
| VPL (Total) | -R\$ 185.126.857,35 | | | | | |
| TIR (Total) | 6,318863% | | | | | |

VI.7. Análises de Sensibilidade

Para a maior parte da análise foi interessante destacar graficamente três faixas de TIR a partir da taxa de juros de longo prazo (TJLP) e taxa de longo prazo (TLP) calculadas pelo BNDES (Figuras 14, 16, 18, 20). A TJLP em maio de 2021 foi igual a 4,61% ao ano, enquanto a TLP era igual a 8,75% ao ano para o IPCA acumulado de março de 2021 (BNDES, 2021).

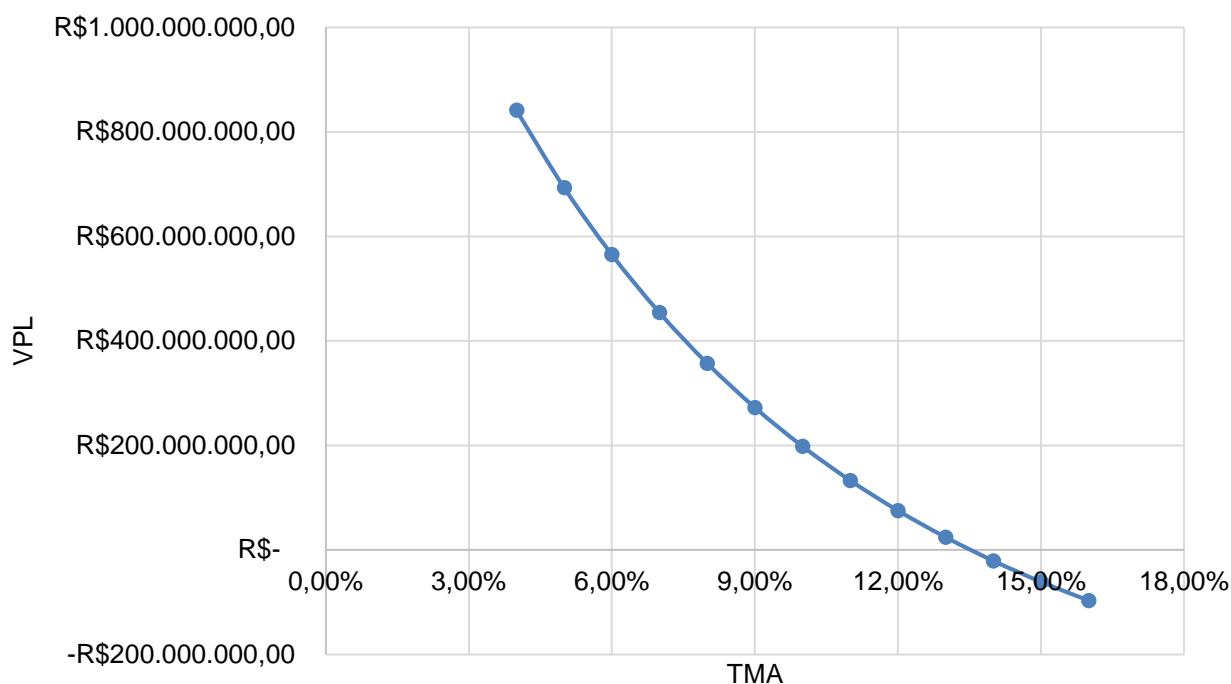
A faixa de TIR entre essas duas taxas foi indicada graficamente pela cor amarela, representando uma faixa em que o prêmio possível no projeto é baixo ou inexistente. A faixa com TIR superior à TLP foi indicada com cor verde, representando uma zona com possibilidade de VPL positiva para valores de TMA com prêmio significativo. Por fim, a faixa com TIR inferior à TJLP foi indicada graficamente com a cor vermelha.

VI.7.1. Taxa Mínima de Atratividade

A primeira análise descrita nessa seção será a partir da sensibilização da TMA do projeto, de forma a permitir avaliar o impacto dessa escolha no VPL observado no cenário base.

Como é possível observar na Figura 12 a variação é bastante acentuada na redução e mais branda quando do aumento da TMA. É possível perceber que, para o cenário base, o VPL ultrapassa os 250 milhões de reais apenas quando a TMA é inferior a 9%, ou seja, bastante próxima às taxas de longo prazo do BNDES e, conseqüentemente, representam menor prêmio.

Figura 12 – Variação do VPL com a sensibilização da TMA.



VI.7.2. Investimento por Tonelada

Como a estimativa de investimento é uma das etapas mais complicadas de um EVTE e confere certo grau de incerteza ao estudo, é interessante analisar os efeitos dessa variável no resultado. Os gráficos representados nas Figuras 13 e 14 apresentam a variação de VPL e TIR, respectivamente, com o investimento fixo por tonelada para melhor visualização dos dados.

Observa-se que se o valor real do investimento por tonelada for superior a R\$ 8 572,79, isto é, um investimento total 13,95% superior ao do cenário base, o projeto torna-se inviável. Em contrapartida, uma diminuição de 5% dessa variável consegue elevar o VPL em 36% e a TIR em 1,4%.

É perceptível que para variações até 50% o comportamento da curva da TIR é próxima do linear. Após um aumento de 20% do investimento por tonelada de PLA o projeto já se encontra numa faixa de possibilidade de prêmio baixa ou inexistente. Com 40% de aumento, o projeto entra na faixa de TIR menor que a TJLA, inviabilizando o projeto inclusive para taxas mínimas de atratividade semelhantes às taxas de longo prazo do BNDES.

Figura 13 – Sensibilização do VPL com variação do investimento fixo.

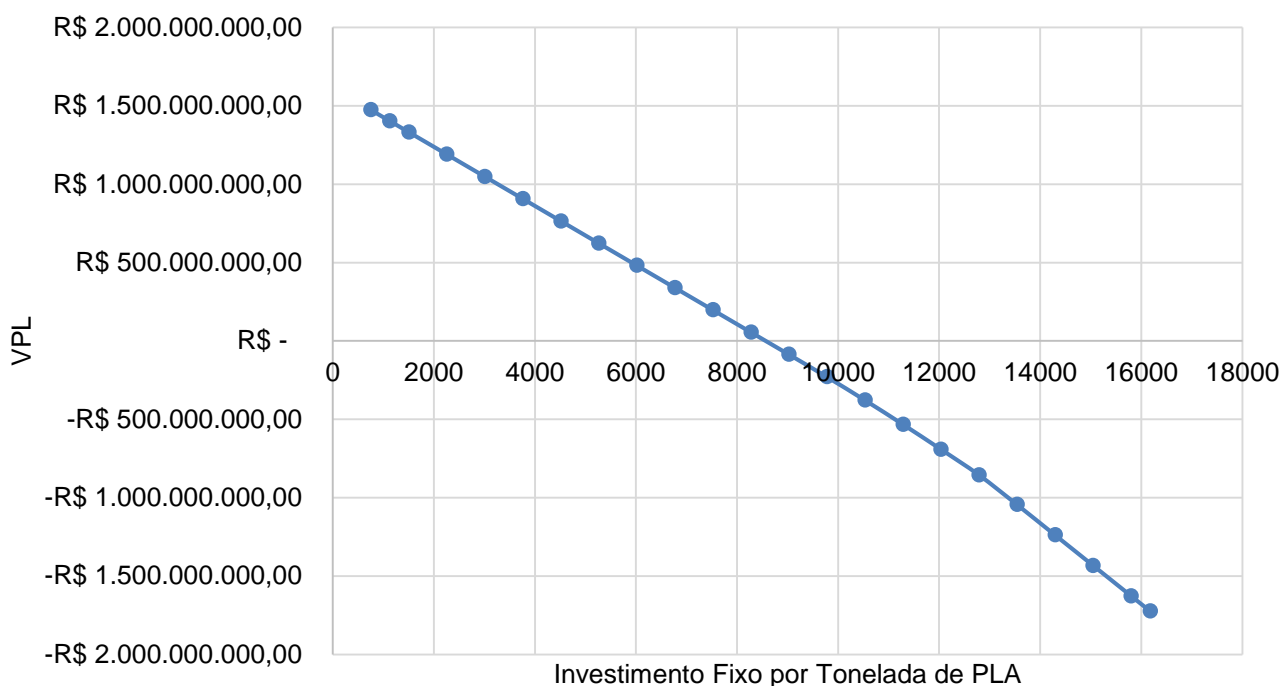
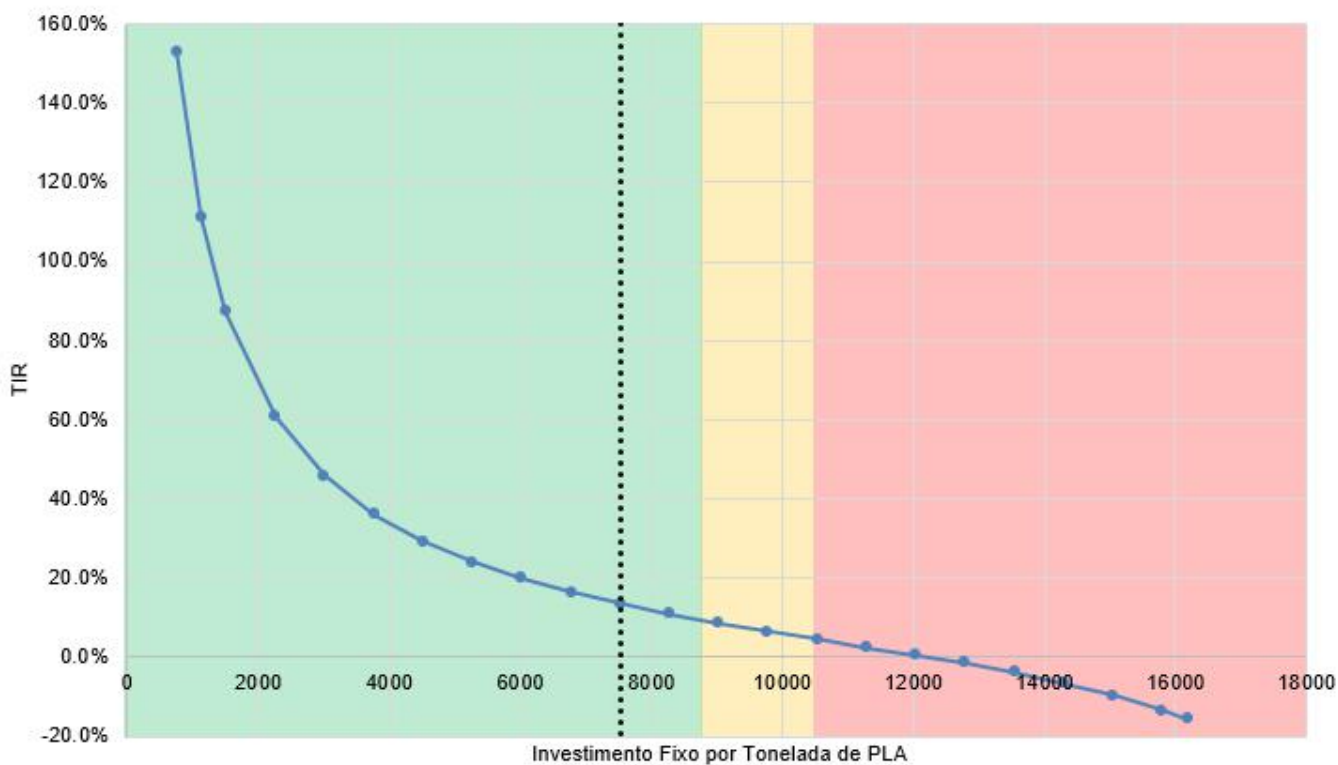


Figura 14 – Sensibilização da TIR com variação do investimento fixo. Linha pontilhada representa a localização do cenário base.



VI.7.3. Preço de Venda

Outro fator escolhido para a análise de sensibilidade do projeto foi o preço de venda do PLA. Conforme descrito na seção IV.2, o cenário base adota como preço o valor de R\$ 5372,29, correspondente a média das importações brasileiras dos últimos cinco anos. As Figuras 15 e 16 mostram o impacto da variação do preço no VPL e TIR, respectivamente.

Como esperado, a variável analisada tem grande influência nos resultados. Ambos VPL e TIR apresentam variação aproximadamente linear em valores próximos do preço base. De imediato, pode-se determinar o mínimo preço de venda que inviabiliza o projeto: R\$ 4 813,20. Portanto, se o preço praticado pelo cenário base sofrer um decréscimo de 10,4%, a viabilidade não seria alcançada.

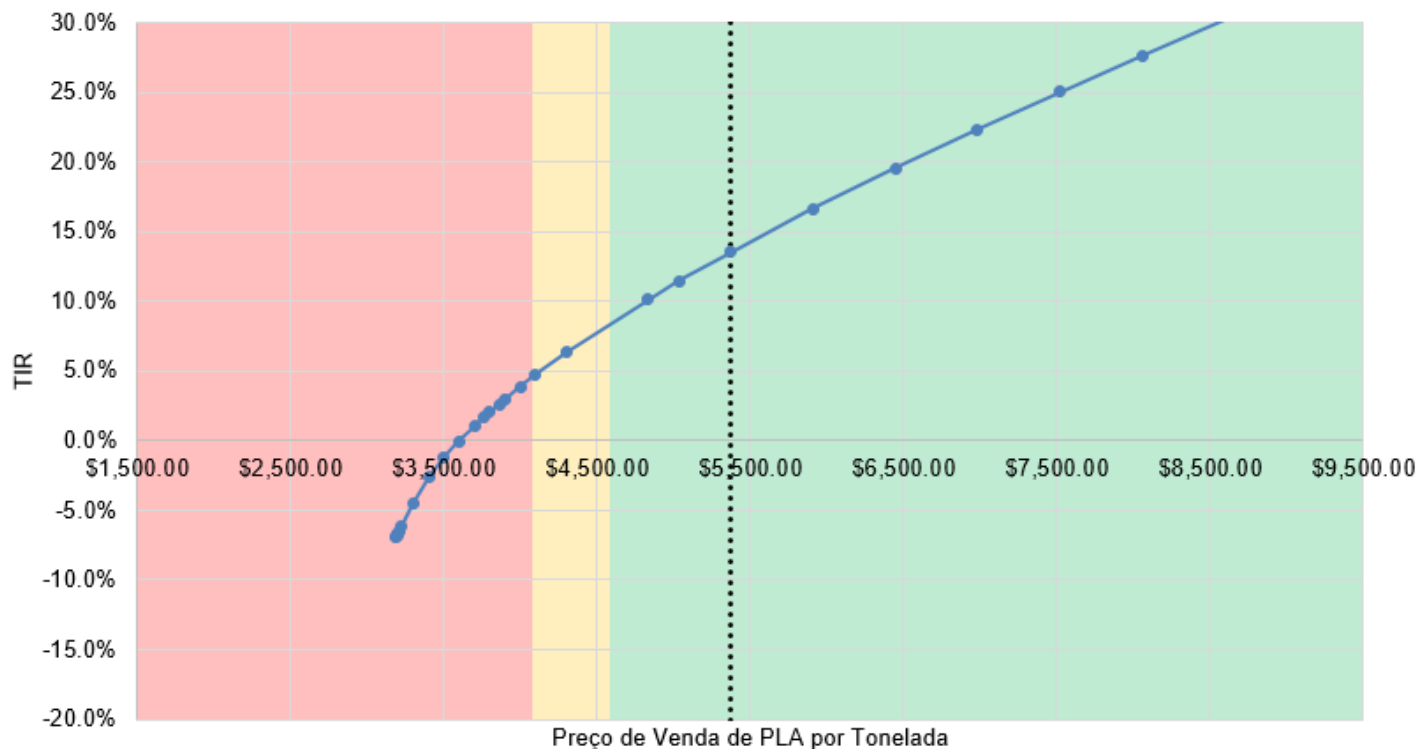
Analisando os gráficos, pode-se observar que um incremento de 5% no preço do cenário base acarreta em aumentos de 48% no VPL e 1,6% na TIR. Similarmente, um decréscimo de 5% decorre em diminuições no VPL e TIR da mesma magnitude do caso anterior.

A faixa de TIR semelhante às taxas de longo prazo do BNDES e, portanto, com baixo potencial de prêmio, inicia-se com reduções por volta de 15% no preço de venda, reforçando o grande impacto que esse fator tem no resultado esperado do projeto. Com reduções superiores a 25% o projeto já tem TIR menor que a TJLP, igual a 4,61%.

Figura 15 – Sensibilização do VPL com variação do preço de venda de PLA.



Figura 16 – Sensibilização da TIR com variação do preço de venda de PLA. Linha pontilhada representa a localização do cenário base.



VI.7.3. Taxa de Ocupação Inicial

Uma das grandes incertezas do projeto consiste na estimativa de tempo em que as aplicações do PLA podem ser desenvolvidas, principalmente no cenário nacional. Inicialmente, foi proposta uma taxa de ocupação para a planta de 70% no primeiro ano de operação, com incremento de 5% a cada ano.

Como é difícil prever o quanto o mercado efetivamente absorverá da produção do polímero, a sensibilização da taxa de ocupação torna-se relevante para os resultados do projeto. Para tanto, serão analisados diferentes valores para essa variável no primeiro ano de operação, mantendo o incremento de 5% ao ano. As figuras 17 e 18 mostram o impacto dessas variações no VPL e TIR respectivamente.

Analisando a figura 17, pode-se verificar que a mínima taxa de ocupação que viabiliza o projeto é 52%. Além disso, uma redução de 5% da taxa utilizada no cenário base implica uma diminuição de 23,5% do VPL.

É perceptível também que para uma taxa de ocupação inicial de 45% a TIR encontra-se menor que a TLA do BNDES e, portanto, numa faixa com prêmio possível baixo ou inexistente para o investidor. Para ocupações iniciais abaixo de 30% a TIR é também inferior à TJLP do BNDES, que representa faixa sem qualquer possibilidade de prêmio na realização do projeto nas condições estudadas.

Figura 17 – Sensibilização do VPL com variação da taxa ocupação inicial.

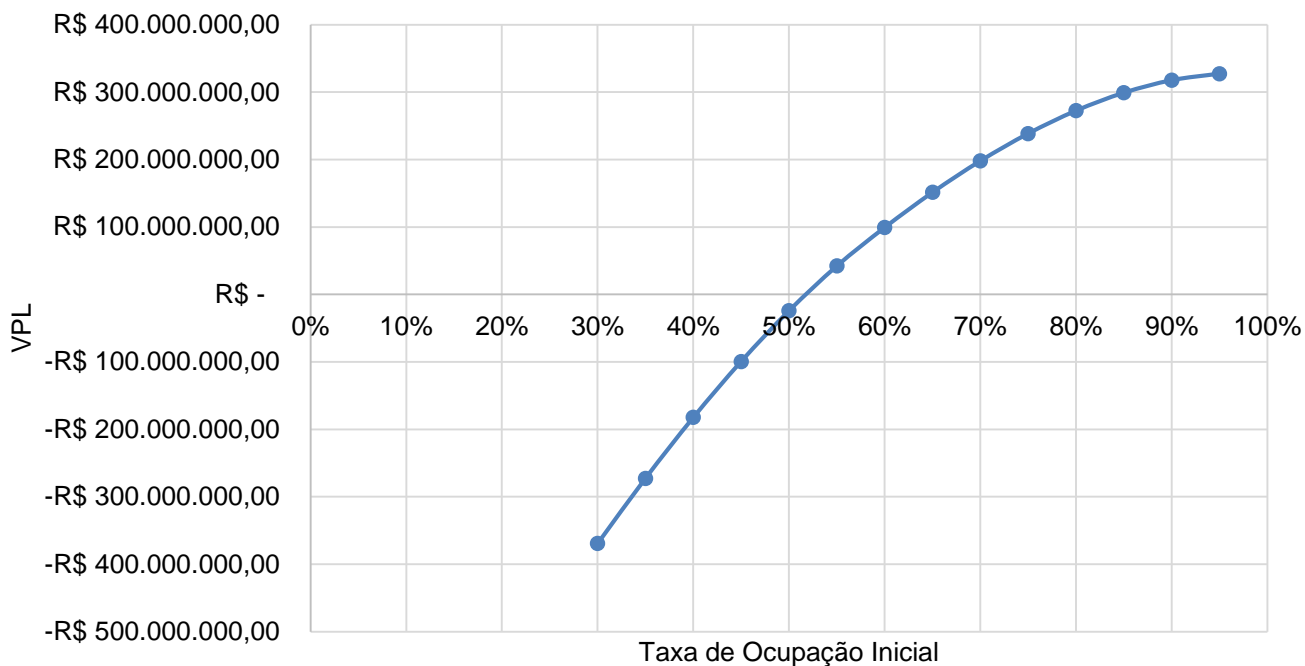
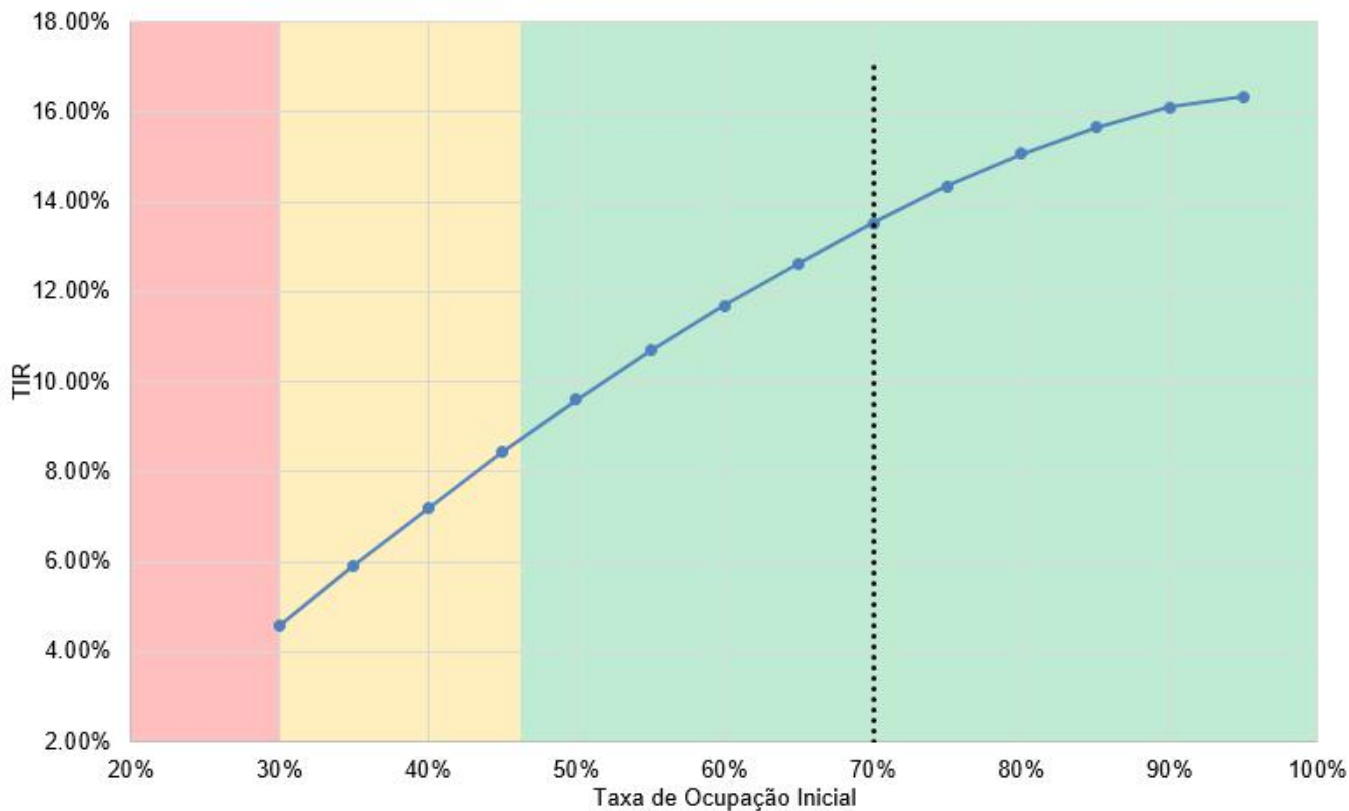


Figura 18 – Sensibilização da TIR com variação da taxa ocupação inicial. Linha pontilhada representa a localização do cenário base.



VI.7.3. Fator de Localização

Pela dificuldade de encontrar valores concretos para o fator de localização e, conseqüentemente, pela definição de um valor arbitrário, fez-se necessário sensibilizar o resultado com a variação desse parâmetro.

As Figuras 19 e 20 mostram o impacto da variação do fator de localização no VPL e TIR, respectivamente.

Para a TMA igual a 10%, o VPL é igual a zero para fator de localização igual a aproximadamente 1,37, o que equivale a uma variação de apenas 14% do valor do cenário base.

Ao analisar a TIR, percebe-se que com aumento de 20% no fator de localização o projeto já entra numa faixa com prêmio possível muito baixo ou nulo, próximo à TLP do BNDES. Com variações maiores que 40%, a TIR encontra-se inclusive abaixo da TJLP do BNDES. Por outro lado, reduções do fator de localização representam significativa vantagem ao projeto. Uma redução de 25% do fator eleva a TIR a aproximadamente 22%, enquanto uma redução por volta de 40% coloca a TIR em valores próximos a 30% (Figura 20).

Figura 19 – Sensibilização do VPL com variação do fator de localização.

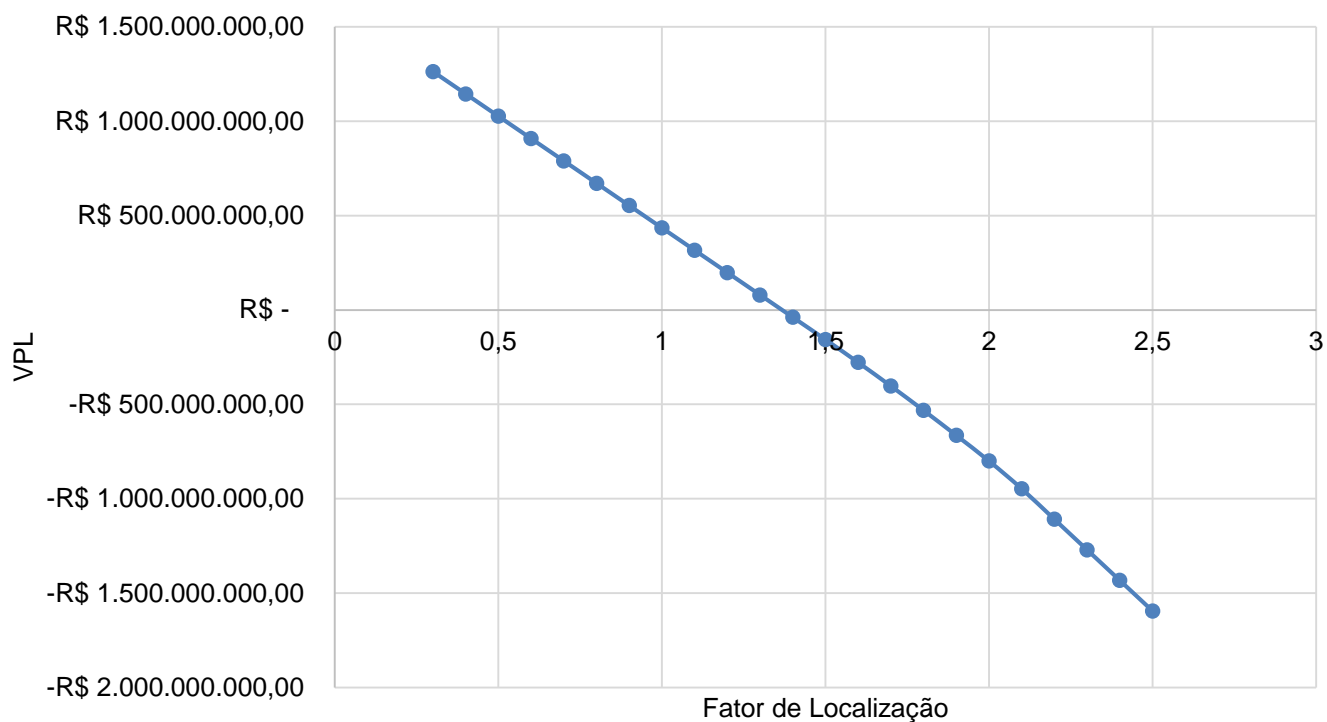
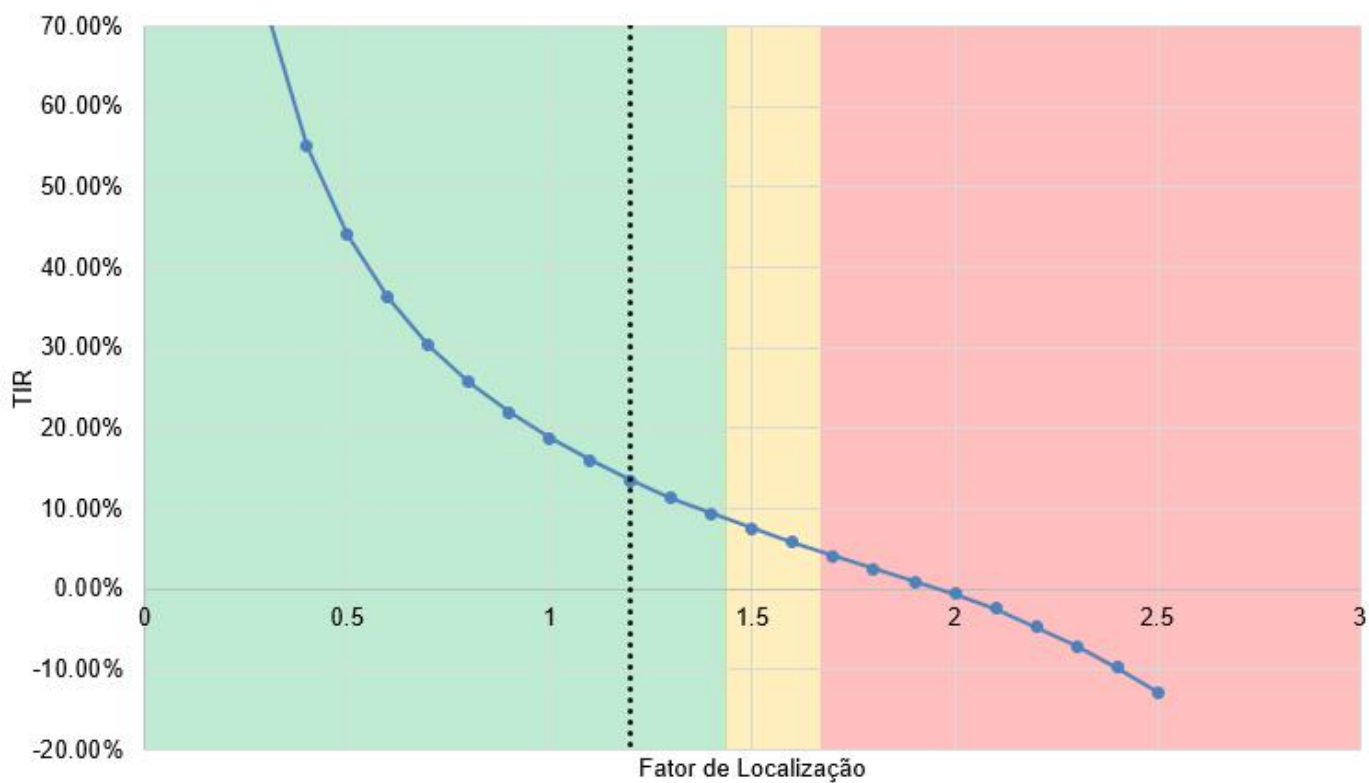


Figura 20 – Sensibilização da TIR com variação do fator de localização. Linha pontilhada representa a localização do cenário base.



VII. DISCUSSÕES

Com base nas premissas definidas no Capítulo VI e metodologia detalhada no Capítulo II, estruturou-se os fluxos de caixa e DRE para o cenário base do projeto, apresentados no capítulo anterior. Para a operação de uma planta com capacidade de 16000 toneladas de PLA ao ano ao longo de 20 anos, o projeto apresentou um VPL igual a R\$ 198.020.088,43 para um TMA de 10% aa e uma TIR de 13,57%. O tempo de retorno do investimento inicial, isto é, o *payback* descontado, ocorre entre os anos 13 e 14, com valor exato de 13,21 anos.

Apesar de ter sido obtido um VPL positivo e uma TIR superior ao valor da TMA arbitrada em 10%, indicando para uma possível viabilidade, ainda são necessárias algumas considerações sobre a atratividade desse projeto. É importante lembrar que o EVTE é um estudo preliminar de oportunidade com alto grau de incerteza associado. Considerando que a TIR obtida já está relativamente próxima à TMA adotada, eventuais alterações nos valores de investimento e preço de venda de PLA, por exemplo, podem culminar na inviabilização do projeto, como demonstrado nas análises de sensibilidade.

O projeto tem viabilidade bastante sensível aos valores de investimento por tonelada, preço de venda de PLA e fator de localização, que é importantíssimo na definição dos valores de investimento. Nos três casos, variações entre 10% e 15% já seriam suficientes para abaixar o VPL a valores negativos e a TIR a valores muito baixos.

Optou-se por testar a sensibilidade com o investimento devido à incerteza da precisão na estimativa desse custo. A análise aponta que um incremento de 13% nos R\$ 600 milhões de investimento resulta em um cenário de inviabilidade. Um erro da ordem de 10% não é improvável em um estudo preliminar de oportunidade. É importante lembrar que o valor dessa despesa foi calculado com base em dados de diferentes fontes da literatura, o que aumenta a incerteza da estimativa inicial. Apenas com um estudo mais detalhado, seria possível determinar se o valor do investimento inviabiliza o projeto.

Outro fator que pode contribuir para a diminuição da atratividade parece ser o elevado investimento inicial necessário para operar a planta, em especial

a parcela competente à produção do ácido láctico. A unidade produtora do monômero do PLA é responsável por 76% dos R\$ 600 milhões de investimento fixo, indicando alto grau de influência sobre a atratividade do projeto. Uma possível alternativa para mitigar esse alto custo, e que aqui é descrita apenas em caráter qualitativo, seria aumentar a capacidade produtiva da planta de ácido láctico, ganhando rentabilidade com o incremento de escala. Ainda que a quantidade de PLA produzida fosse mantida constante, o ácido láctico excedente poderia ser comercializado, configurando uma nova fonte de receita para o projeto.

Vale destacar que a proposição inicial desse estudo é adaptar uma usina de açúcar existente, caminhando para um modelo de biorrefinaria, de modo que a principal matéria-prima da fermentação, o melaço, é adquirida a custo zero, pois é obtida como um subproduto da produção de açúcar. No entanto, esse produto também tem valor comercial, de modo que o projeto deva ser atraente o suficiente para compensar a perda da receita com a venda de melaço e remunerar o risco de investir em um novo negócio.

Nesse sentido, conforme demonstrado na seção VI.6, a perda da receita da venda de melaço atua diminuindo os retornos efetivos proporcionados pelo projeto, a tal ponto que o VPL obtido tem valor negativo e a TIR foi igual a 6,32%, valor que é inferior à taxa de longo prazo (TLP) do BNDES e bastante próximo da taxa de juros de longo prazo (TJLP) do BNDES e, portanto, pode-se considerar a possibilidade de prêmio baixo ou nulo para o investidor.

Contudo, esse resultado não deve ser interpretado como total inviabilidade para o projeto, uma vez que essa perda de receita é uma saída não-monetária, ou seja, não configura uma despesa a ser desembolsada. Uma interpretação mais adequada seria a de que os lucros adicionais obtidos com a transição para o modelo de produção de PLA ficaram abaixo do retorno esperado pelo projeto, aqui representado pela TMA de 10%. Ademais, observa-se que proposição de obtenção do melaço a custo zero é essencial para o projeto, de modo que, se for necessário pagar pela utilização dessa matéria-prima, não haverá viabilidade.

Ainda é relevante discutir a capacidade do mercado brasileiro em consumir PLA em quantidade suficiente para justificar a realização do projeto. Atualmente, esse consumo pode ser considerado insignificante, em média de

algumas dezenas de toneladas ao ano, como descrito na Seção VI.2. Recentes regulações de alguns mercados de plásticos de uso único, principalmente por legislaturas estaduais e municipais, podem ser a chave para o crescimento do consumo de bioplásticos no Brasil. Entretanto, esse mercado tem sido, muitas vezes, suprido por plásticos oxo-degradáveis, ou seja, plásticos convencionais aditivados. Por esses motivos, é inviável ou cedo demais pensar num amplo mercado de bioplásticos nacional. Consequentemente, faz-se necessária a atenção exclusiva a mercados de nicho, que podem não ser suficientes como única fonte de demanda.

Uma forma de avaliar o impacto causado pela rapidez com que o mercado adotará o PLA é fazer uma análise de sensibilidade para a taxa de ocupação inicial da planta. Como demonstrado na seção VI, o projeto consegue manter VPL positivo (com TMA igual a 10%) para taxas superiores a 52%, em contraste com a taxa de 70% adotada no cenário base. É importante lembrar que a média dos últimos 5 anos das importações de PLA no Brasil foi de apenas 76,67 toneladas. Assim, enquanto as aplicações do polímero não forem desenvolvidas no cenário nacional, pode-se destinar a maior parte da produção para a exportação.

Mesmo em taxas de ocupação menores para a planta de PLA, a atratividade do projeto pode ser melhorada caso o ácido láctico excedente seja vendido enquanto a ocupação for menor do que 95%. Contudo, como mencionado anteriormente, esta proposta é aqui apresentada apenas em caráter qualitativo. Para este trabalho, adotou-se uma abordagem mais conservadora, de modo a avaliar a viabilidade do projeto apenas com base no mercado de PLA.

Um dos grandes entraves à ampla adoção do PLA pelo mercado é, sem dúvida, o preço elevado de venda, o qual decorre de processos muito onerosos. Vale ressaltar que as rotas tecnológicas abordadas neste estudo foram escolhidas por apresentarem maior grau de maturidade tecnológica, sendo as mais utilizadas na indústria. No entanto, o PLA é um material relativamente novo no mercado, de modo que existe muito espaço para inovação e aprimoramento na tecnologia existente. Tais melhorias, em especial na onerosa etapa de obtenção do ácido láctico, podem ser fundamentais para o aumento da competitividade desse polímero frente a outros materiais.

VIII. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho consistiu na elaboração de um estudo de viabilidade técnica e econômica de uma unidade produtora de PLA no Brasil. O modelo produtivo integrado é separado em duas partes: obtenção do monômero, ácido láctico, e polimerização.

Para as rotas de produção adotadas, optou-se por aquelas amplamente utilizadas na indústria, as quais possuem maior grau de maturidade tecnológica. A rota de obtenção do ácido láctico consiste em processo tradicional de fermentação com produção de gesso, enquanto a polimerização do PLA é feita via abertura de anel.

A estruturação do caso brasileiro foi elaborada de forma a aproveitar o potencial produtivo agrícola do país. A cana-de-açúcar se destaca como possível matéria-prima devido ao seu enorme volume de produção e por possuir um papel central na indústria sucroalcooleira. De modo a agregar valor às usinas produtoras de açúcar brasileiras, optou-se por utilizar o subproduto do processamento da cana-de-açúcar, o melaço, para fonte de carbono da fermentação.

O estudo do mercado de PLA apresentou projeções de crescimento global, com os EUA como principal mercado, principalmente nos setores de embalagem, têxtil e automobilístico. Em contrapartida, o mercado brasileiro se revelou muito limitado, o que pode ser um dos grandes entraves ao desenvolvimento do projeto.

A localização da planta industrial foi decidida com base em critérios de proximidade às fontes de matéria-prima, aos pontos de exportação e aos possíveis mercados internos. Após a análise dos dados pertinentes, foi determinado preliminarmente que o estado de São Paulo seria a localidade mais adequada, pois possui a maior concentração de produtores de açúcar, bem como portos para a exportação e setores transformadores de plásticos que podem absorver a produção de PLA.

As estimativas de custo e investimento foram realizadas com base na adaptação de dados disponíveis para uma planta com capacidade produtiva de 100.000 t/ano de ácido láctico e outra de 10.000 t/ano de PLA. A escolha para a escala de produção (16.000 t/ano) foi feita de modo a adequar os dados para

uma capacidade produtiva intermediária. Ademais, tal escolha é compatível com a realidade de outras plantas produtoras de PLA no mundo.

Com a elaboração dos fluxos de caixa e DRE para o projeto, chegou-se a um valor positivo para o VPL (R\$ 198.020.088,43), com TIR igual a 13,52%. Vale ressaltar a importância do modelo de negócios adotado para a viabilidade obtida no projeto. A produção totalmente integrada a uma usina de açúcar possibilitou a aquisição da principal matéria-prima, o melaço, a custo zero, importante fator para garantir a viabilidade econômica do projeto. Além disso, a exploração tanto de vendas locais quanto de exportação é outro importante ponto do modelo de negócio, que, em conjunto com um foco em aquisição de clientes e criação de mercado consumidor no Brasil, permite traçar meios de contornar a situação mercadológica desfavorável nacionalmente.

Uma vez que os resultados iniciais apontaram para um cenário favorável de viabilidade, é necessário ponderar sobre por quais motivos nenhuma iniciativa semelhante tenha sido realizada no Brasil. As análises de sensibilidade podem começar a elucidar esse questionamento, uma vez que demonstram alguns pontos de fragilidade do projeto. Três variáveis testadas, em especial, exercem grande influência sobre os resultados, preço de venda, investimento por tonelada e fator de localização, e podem inviabilizar o projeto com desvios entre e 10% e 15% dos valores do cenário base utilizado.

Além disso, a análise apresentada na seção VI.6 aponta que, para um cenário em que a perda de receita de melaço é contabilizada, o projeto torna-se significativamente menos atraente, alcançando TIR de apenas 6,32%, o que resulta num prêmio possível muito baixo ou nulo ao investidor. Isso significa que esse investidor ou produtor de açúcar no Brasil pode ter baixo retorno na troca da comercialização do melaço pela produção de PLA a partir desse subproduto.

Ademais, o mercado brasileiro de PLA ainda é ínfimo, com média de importação não superior a 80 toneladas nos últimos 5 anos. A incerteza sobre o tempo necessário para que haja o desenvolvimento de mercado para o polímero no país é, certamente, um fator desestimulador para o projeto. Embora o PLA esteja melhor posicionado no mercado externo, é importante lembrar que o polímero ainda apresenta custo elevado, principalmente quando comparado aos seus competidores de origem não-renovável. Por fim, o alto investimento inicial necessário, cerca de R\$ 600 milhões, para entrar em um mercado ainda

incipiente também pode representar um fator de alto risco para potenciais investidores.

Assim, apesar dos resultados iniciais favoráveis, as incertezas supracitadas do modelo econômico de produção proposto aliadas às limitações mercadológicas brasileiras, levam a conclusão de que os riscos do projeto se apresentam, atualmente, muito elevados para a realização de uma planta de produção de PLA a partir do melaço de cana-de-açúcar de forma integrada à indústria açucareira brasileira nos moldes estabelecidos nesse trabalho.

Contudo, foram observados alguns pontos do projeto que podem ser adaptados, de modo a torná-lo mais atrativo. Primeiramente, é importante mencionar que o projeto foi elaborado assumindo investimento com capital 100% próprio. Esse tipo de empreendimento é passível de financiamento, que pode ser usado para alavancar o projeto a custo mais baixo. Neste sentido, seria interessante outro estudo que abordasse as possíveis influências dessa alavancagem nos resultados.

Como mencionado na seção VII, também há possibilidade de que os resultados sejam melhorados caso haja produção e venda de ácido láctico para além da quantidade utilizada na síntese de PLA. Para tanto, seriam necessários outros estudos que explorem as oportunidades nesse mercado específico, tanto nacional quanto internacionalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A CRÍTICA. **Projeto de Lei que proíbe canudos plásticos no AM é aprovado na Aleam**. 2020. Disponível em:
<https://www.acritica.com/channels/manaus/news/projeto-de-lei-que-proibe-canudos-plasticos-no-am-e-aprovado-na-aleam>. Acesso em: 14 maio 2021.
- ABDEL-RAHMAN, M. A., TASHIRO, Y., SONOMOTO, K. "Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria: Overview and limits", **Journal of Biotechnology**, v. 156, n. 4, p. 286–301, 2011. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2011.06.017. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.06.017>.
- ABIPLAST. **Perfil 2018 - Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico**. . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em:
<http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>.
- ABIQUIM. **Custo total da mão de obra no segmento de produtos químicos de uso industrial: CTMO: 1994/2017**. 2018. Disponível em:
<https://abiquim.org.br/publicacoes/publicacao/38>. Acesso em: 14 maio 2021.
- ABRE. **ESTUDO ABRE MACROECONÔMICO DA EMBALAGEM E CADEIA DE CONSUMO**. 2020. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/ano2019/>. Acesso em: 14 maio 2021.
- ANDREESSEN, C., STEINBÜCHEL, A. "Recent developments in non-biodegradable biopolymers: Precursors, production processes, and future perspectives", **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, n. 1, p. 143–157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9483-6>. .
- ANP. "BOLETIM DO ETANOL Nº09/2017 FEVEREIRO", p. 1–9, 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>.
- AURAS, R., HARTE, B., SELKE, S. "An Overview of Polylactides as Packaging Materials", **Macromolecular Bioscience**, v. 4, n. 9, p. 835–864, 16 set. 2004. DOI: 10.1002/mabi.200400043. Disponível em:
<http://doi.wiley.com/10.1002/mabi.200400043>.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de**

materiais e distribuição física. 2. ed. São Paulo, Atlas, 2007.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Focus - Relatório de Mercado (1 de abril de 2021)**. . [S.l: s.n.], 2021.

BENEVENUTI, C. S. J. **Prospecção tecnológica da produção de ácido láctico no contexto de biorrefinaria: Tendências e oportunidades**. 2016. 87 f. Univresidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

BIOPLASTIC NEWS. **Who is NatureWorks?** 2018. Disponível em: <https://bioplasticsnews.com/2018/06/05/natureworks-saga-thai-fiasco/>. Acesso em: 12 maio 2021.

BLEDZKI, A. K., JASZKIEWICZ, A. "Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres – A comparative study to PP", **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 12, p. 1687–1696, out. 2010. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.06.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.06.005>.

BNDES. **Taxa de Juros de Longo Prazo - TJLP**. 2021a. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/taxa-juros-longo-prazo-tjlp>. Acesso em: 5 maio 2021.

BNDES. **Taxa de Longo Prazo - TLP**. 2021b. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo>. Acesso em: 5 maio 2021.

BRASKEM. **POLIETILENO VERDE I'M GREEN™ (PE VERDE I'M GREEN™)**. 2021. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/PE-Verde-Produtos-e-Inovacao>. Acesso em: 15 mar. 2021.

BROUWER, R., HADZHIYSKA, D., IOAKEIMIDIS, C., *et al.* "The social costs of marine litter along European coasts", **Ocean and Coastal Management**, v. 138, p. 38–49, 2017. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.01.011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.011>.

CANILHA, L., CHANDEL, A. K., SUZANE DOS SANTOS MILESSI, T., *et al.* "Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: An overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation", **Journal of Biomedicine and**

Biotechnology, v. 2012, p. 15, 2012. DOI: 10.1155/2012/989572. .

CARVALHO, A. C. M. de. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DO POLI(ÁCIDO LÁCTICO) PARA POTENCIAL USO EM SISTEMAS DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÁRMACOS**. 2013. 109 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

CAVALCANTE, L. R. **TD nº 287, de 2020: Encargos Trabalhistas no Brasil**. . [S.l: s.n.], 2020.

CHAN, C. M., VANDI, L. J., PRATT, S., *et al.* "Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review", **Polymer Reviews**, v. 58, n. 3, p. 444–494, 2018. DOI: 10.1080/15583724.2017.1380039. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15583724.2017.1380039>.

CIPRIANO, T. F. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE AGENTE NUCLEANTE NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, MECÂNICAS, REOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS DE POLI(ÁCIDO LÁCTICO) COMERCIAL**. 2013. 125 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

COLWILL, J. A., WRIGHT, E. I., RAHIMIFARD, S., *et al.* "Bio-plastics in the context of competing demands on agricultural land in 2050", **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 5, n. 1, p. 3–16, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.602439>. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.602439>.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar V.7 - Safra 2019/20 - N.3 - Terceiro levantamento | Dezembro 2020. Conab - Companhia Nacional de Abastecimento**. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.

CORBION. **Replacing sugar and starch: Finding second generation feedstock**. 2021. Disponível em: <http://www.corbion.com/about-corbion/corbion-stories/replacing-sugar-and-starch>. Acesso em: 14 maio 2021.

DARMON, G., MIAUD, C., CLARO, F., *et al.* "Risk assessment reveals high exposure of sea turtles to marine debris in French Mediterranean and metropolitan Atlantic waters", **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in**

Oceanography, v. 141, p. 319–328, 2017. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.07.005.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.07.005>.

DEUDERO, S., ALOMAR, C. "Mediterranean marine biodiversity under threat: Reviewing influence of marine litter on species", **Marine Pollution Bulletin**, v. 98, n. 1–2, p. 58–68, 2015. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.012>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Delivering the Circular Economy a Toolkit for Policymakers**. . [S.l: s.n.], 2015. Disponível em:

https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/government/EMF_TFPM_ExecSum_11-9-15.pdf.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The New Plastics Economy: Rethinking Plastics, starting with packaging**. World Economic Forum. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em:

<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>.

EMADIAN, S. M., ONAY, T. T., DEMIREL, B. "Biodegradation of bioplastics in natural environments", **Waste Management**, v. 59, p. 526–536, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.006. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>.

ENDRES, H.-J., SIEBERT-RATHS, A. **Engineering Biopolymers: Markets, Manufacturing, Properties and Applications**. Munique, Alemanha, Carl Hansen Verlag, 2011.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastic Market Data 2019**. . [S.l: s.n.], 2019.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics: Facts and Figures**. . [S.l: s.n.], 2018a. Disponível em: https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market data 2018**. . [S.l: s.n.], 2018b. Disponível em: https://www.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2016/02/Report_Bioplastics-Market-Data_2018.pdf.

FIGUREIREDO, F. **Lei que proíbe distribuição e venda de canudos de plástico entra em vigor no Amapá**. 2020. G1. Disponível em:

<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/01/13/lei-que-proibe-distribuicao-e->

venda-de-canudos-de-plastico-entra-em-vigor-no-amapa.ghtml.

G1. Covas sanciona lei que proíbe estabelecimentos de fornecer utensílios plásticos descartáveis na cidade de SP. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/01/13/sancionada-lei-que-proibe-fornecimento-de-utensilios-plasticos-descartaveis-a-clientes-em-sp.ghtml>. Acesso em: 14 maio 2021.

GARLOTTA, D. "A literature review of poly(lactic acid)", **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2001. DOI: 10.1023/A:1020200822435. .

GERE, D., CZIGANY, T. "Future trends of plastic bottle recycling: Compatibilization of PET and PLA", **Polymer Testing**, v. 81, p. 106160, jan. 2020. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106160. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941819313522>.

GEZAE DAFUL, A., GÖRGENS, J. F. "Techno-economic analysis and environmental impact assessment of lignocellulosic lactic acid production", **Chemical Engineering Science**, v. 162, p. 53–65, 2017. DOI: 10.1016/j.ces.2016.12.054. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.054>.

GHAFFAR, T., IRSHAD, M., ANWAR, Z., *et al.* "Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification", **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 7, n. 2, p. 222–229, 2014. DOI: 10.1016/j.jrras.2014.03.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2014.03.002>.

GRAND VIEW RESEARCH. **Polylactic Acid Market Size, Share & Trends Analysis Report By End-use (Packaging, Textile, Agriculture, Automotive & Transport, Electronics), By Region (North America, APAC, Europe), And Segment Forecasts, 2021 - 2028.** 2021. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polylactic-acid-pla-market>. Acesso em: 14 maio 2021.

GUPTA, B., REVAGADE, N., HILBORN, J. "Poly(lactic acid) fiber: An overview", **Progress in Polymer Science**, v. 32, n. 4, p. 455–482, 2007. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005. .

- GUZMAN, D. de. **Corbion to Expand Lactic Acid Capacity in North America**. 2021. Green Chemicals Blog. Disponível em: <https://greenchemicalsblog.com/2021/01/22/corbion-to-expand-lactic-acid-capacity-in-north-america/>. Acesso em: 15 maio 2021.
- HAMAD, K., KASEEM, M., AYYOOB, M., *et al.* "Polylactic acid blends: The future of green, light and tough", **Progress in Polymer Science**, v. 85, p. 83–127, 2018. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2018.07.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.001>.
- HARRIS, A. M., LEE, E. C. "Improving mechanical performance of injection molded PLA by controlling crystallinity", **Journal of Applied Polymer Science**, v. 107, n. 4, p. 2246–2255, 15 fev. 2007. DOI: 10.1002/app.27261. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.27261>.
- HU, Y., DAOUD, W. A., CHEUK, K. K. L., *et al.* "Newly developed techniques on polycondensation, ring-opening polymerization and polymer modification: Focus on poly(lactic acid)", **Materials**, v. 9, n. 3, 2016. DOI: 10.3390/ma9030133. .
- HWANG, K., JEON, W., LEE, S. Y., *et al.* "Sustainable bioplastics: recent progress in the production of bio-building blocks for the bio-based next-generation polymer PEF", **Chemical Engineering Journal**, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124636. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124636>.
- IBGE. **Inflação**. 2021a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 13 maio 2021.
- IBGE. **PANORAMA - IBGE**. 2021b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 14 maio 2021.
- ILOS. **CUSTOS LOGÍSTICOS NO BRASIL**. 2021. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/analise-de-mercado/relatorios-de-pesquisa/custos-logisticos-no-brasil/>. Acesso em: 14 maio 2021.
- INTRATEC. **Process Plant Cost Indexes**. 2021. Disponível em: <https://www.intratec.us/products/process-plant-cost-indexes>. Acesso em: 14 maio 2021.

IPEA. **Taxa de câmbio comercial para venda: real (R\$) / dólar americano (US\$) - média**. 2021. Disponível em:

<http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=31924>. Acesso em: 14 maio 2021.

JAHNO, V. D. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DO POLI (L-ÁCIDO LÁCTICO) PARA USO COMO BIOMATERIAL**. 2005. 77 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

JAMSHIDIAN, M., TEHRANY, E. A., IMRAN, M., *et al.* "Poly-Lactic Acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies", **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 5, p. 552–571, 2010. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x. .

JEM, K. J., TAN, B. "The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid)", **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 2, p. 60–70, 2020. DOI: 10.1016/j.aiepr.2020.01.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.01.002>.

JUNIOR, F. dos S. P., ZEITUNI, C. A., ROSTELATO, M. E. C. M., *et al.* "Desenvolvimento da metodologia para síntese do poli(ácido láctico-co-ácido glicólico) para utilização na produção de fontes radioativas", **Polimeros**, v. 25, n. 3, p. 317–325, 2015. DOI: 10.1590/0104-1428.1428. .

KÖRNER, I., REDEMANN, K., STEGMANN, R. "Behaviour of biodegradable plastics in composting facilities", **Waste Management**, v. 25, n. 4 SPEC. ISS., p. 409–415, 2005. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.02.017. .

KWAN, T. H., HU, Y., LIN, C. S. K. "Techno-economic analysis of a food waste valorisation process for lactic acid, lactide and poly(lactic acid) production", **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 72–87, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.179. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618302014>.

LASPRILLA, A. J. R., MARTINEZ, G. A. R., LUNELLI, B. H., *et al.* "Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices - A review", **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 1, p. 321–328, 2012. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.06.019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.019>.

LIM, L. T., AURAS, R., RUBINO, M. "Processing technologies for poly(lactic acid)", **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 33, n. 8, p. 820–852, 2008. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004. .

LOONEY, R. "The Gulf War and the Price of Oil: Prospects for the Medium Term", **The Journal of Social, Political, and Economic Studies**, v. 17, n. 3, p. 273, 1992. .

MANANDHAR, A., SHAH, A. "Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid Production Utilizing Corn Grain as Feedstock", **Process Simulation and Techno-Economic Analysis of Food and Bioproducts Processing Systems**, v. 8, n. 2, p. 199, 6 fev. 2020. DOI: 10.3390/pr8020199. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/199>.

MCKEOWN, P., ROMÁN-RAMÍREZ, L. A., BATES, S., *et al.* "Zinc Complexes for PLA Formation and Chemical Recycling: Towards a Circular Economy", **ChemSusChem**, v. 12, n. 24, p. 5233–5238, 19 dez. 2019. DOI: 10.1002/cssc.201902755. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.201902755>.

MEHTA, R., KUMAR, V., BHUNIA, H., *et al.* "Synthesis of poly(lactic acid): A review", **Journal of Macromolecular Science - Polymer Reviews**, v. 45, n. 4, p. 325–349, 2005. DOI: 10.1080/15321790500304148. .

MENEZES, J. da S. **DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS HÍBRIDAS DE AMIDO TERMOPLÁSTICO E POLI(ÁCIDO LÁTICO) INDIVIDUALMENTE PLASTIFICADOS**. 2015. 116 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA DO BRASIL. **Comex Stat**. 2021. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 14 maio 2021.

MOTTA, A. C., DUEK, E. A. R. "Synthesis, characterization and "in vitro" Degradation of PLLA", **Polimeros**, v. 16, n. 1, p. 26–32, 2006. DOI: 10.1590/s0104-14282006000100008. .

NAGARAJAN, V., MOHANTY, A. K., MISRA, M. "Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance", **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 4, n. 6, p. 2899–2916, 6 jun. 2016. DOI:

10.1021/acssuschemeng.6b00321. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.6b00321>.

NANDA, M. R., MISRA, M., MOHANTY, A. K. "The Effects of Process Engineering on the Performance of PLA and PHBV Blends", **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 296, n. 8, p. 719–728, 15 ago. 2011. DOI: 10.1002/mame.201000417. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/mame.201000417>.

NARAYANAN, N., ROYCHOUDHURY, P. K., SRIVASTAVA, A. "L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization", **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 2, 2004. DOI: 10.2225/vol7-issue2-fulltext-7. .

NATUREWORKS. **NatureWorks announces additional lactide monomer purification technology to expand the availability of Ingeo biopolymer from Blair facility**. 2020. Disponível em:

<https://www.natureworkslc.com/News-and-Events/Press-Releases/2020/2020-09-22-Blair-Investment-Announcement>. Acesso em: 12 maio 2021.

OHARA, H. "Biorefinery", **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 62, n. 5–6, p. 474–477, 1 out. 2003. DOI: 10.1007/s00253-003-1383-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-003-1383-7>.

ONDREY, G. **A PLA PLANT WITH NEW SULZER/PURAC TECHNOLOGY STARTS UP IN THE NETHERLANDS**. 2021. Chemical Engineering Essentials for the CPI Professional. Disponível em: <https://www.chemengonline.com/a-pla-plant-with-new-sulzerpurac-technology-starts-up-in-the-netherlands/>. Acesso em: 12 maio 2021.

OROSKI, F. D. A., ALVES, F. C., BOMTEMPO, J. V. "Section Bioplastics Tipping Point :", **Journal of Business Chemistry**, v. 11, n. 1, p. 8, 2014. .

OROSKI, F. de A. **MODELOS DE NEGÓCIO E TRANSIÇÃO DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS: o caso dos bioplásticos**. 2013. 195 f. Univerdidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

OSTERWALDER, A. **THE BUSINESS MODEL ONTOLOGY A PROPOSITION IN A DESIGN SCIENCE APPROACH**. 2004. 169 f. Université de Lausanne, 2004.

OSTERWALDER, A., PIGNEUR, Y. **Business Model Generation**. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

OSTLE, C., THOMPSON, R. C., BROUGHTON, D., *et al.* "The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series", **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 8–13, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-09506-1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>.

PACHÓN, E. R., VASKAN, P., RAMAN, J. K., *et al.* "Transition of a South African sugar mill towards a biorefinery. A feasibility assessment", **Applied Energy**, v. 229, n. July, p. 1–17, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.104. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.104>.

PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 4. ed. Singapura, McGraw-Hill, Inc., 1991.

PLAST EUROPE. **Europe's first PLA pilot plant inaugurated**. 2010. Plast Europe. Disponível em: https://www.plasteurope.com/news/FUTERRO_t216042/. Acesso em: 5 maio 2021.

PLAST EUROPE. **First PLA plant using ThyssenKrupp process starts in China / "Resource friendly"**. 2018. Disponível em: https://www.plasteurope.com/news/COFCO_t240963/. Acesso em: 22 mar. 2021.

PLASTICS EUROPE. **Plastics - the Facts 2019**. . [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.

RAIS, A. **Total Corbion Launches World's Second-Largest PLA Bioplastics Plant**. 2018. Process Worldwide. Disponível em: <https://www.process-worldwide.com/total-corbion-launches-worlds-second-largest-pla-bioplastics-plant-a-782418/>. Acesso em: 18 maio 2021.

SOROUDI, A., JAKUBOWICZ, I. "Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review", **European Polymer Journal**, v. 49, n. 10, p. 2839–2858, 2013. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025>.

SOUZA, B. **CONHEÇA A CBPAK, EMPRESA QUE TRANSFORMA**

MANDIOCA EM EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS. 2016. Draft. Disponível em: <https://www.projetodraft.com/conheca-a-cbpak-empresa-que-transforma-mandioca-em-embalagens-biodegradaveis/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

SULZER. **Sulzer PLA Technology.** 2021. Disponível em: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/polymer_production_technology/brochures/sulzer_pla_technology.ashx?la=en. Acesso em: 18 maio 2021.

TOWLER, G., SINNOTT, R. **Chemical Engineering Design: Principles, practice and economics of plant and process design.** 2. ed. Oxford, Reino Unido, Butterworth-Heinemann is, 2013.

TRIBE, M. A., ALPINE, R. L. W. "Scale economies and the "0.6 rule"", **Engineering Costs and Production Economics**, v. 10, n. 4, p. 271–278, dez. 1986. DOI: 10.1016/S0167-188X(86)80025-8. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167188X86800258>.

ULRICH, G. D. **A guide to chemical engineering process design and economics.** [S.l.], John Wiley & Sons, Inc., 1984.

UNEP. **Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change.** . Nairobi, [s.n.], 2016. Disponível em: http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7720/-Marine_plasctic_debris_and_microplastics_Global_lessons_and_research_to_inspire_action_and_guide_policy_change-2016Marine_Plastic_Debris_and_Micropla.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. **What is the Kyoto Protocol?** 2021. UNFCCC. Disponível em: https://unfccc.int/kyoto_protocol. Acesso em: 12 maio 2021.

VINK, E. T. H., DAVIES, S., KOLSTAD, J. J. "The eco-profile for current Ingeo® polylactide production", **Industrial Biotechnology**, v. 6, n. 4, p. 212–224, 2010. DOI: 10.1089/ind.2010.6.212. .

VINK, E. T. H., RÁBAGO, K. R., GLASSNER, D. A., *et al.* "Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production", **Polymer Degradation and Stability**, v. 80, n. 3, p. 403–419, jan. 2003. DOI:

10.1016/S0141-3910(02)00372-5. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391002003725>.

WEE, Y. J., KIM, J. N., RYU, H. W. "Biotechnological production of lactic acid and its recent applications", **Food Technology and Biotechnology**, v. 44, n. 2, p. 163–172, 2006. .

ZAREMBA, J. **Em um ano, canudos de plástico são proibidos em 8**

estados e no DF. 2020. Folha de São Paulo. Disponível em:

<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2020/01/em-um-ano-canudos-de-plastico-sao-proibidos-em-8-estados-e-no-df.shtml>. Acesso em: 14 maio 2021.