

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

BRUNO ARRUDA MARTINS



ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA
PLANTA DE ÁCIDO CÍTRICO UTILIZANDO OS RESÍDUOS
DO PROCESSAMENTO DA LARANJA

RIO DE JANEIRO

2024

BRUNO ARRUDA MARTINS

ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA PLANTA DE ÁCIDO
CÍTRICO UTILIZANDO OS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA LARANJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador: Fábio de Almeida Oroski

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

M386e Martins, Bruno Arruda
 Estudo de pré-viabilidade econômica de uma planta
de ácido cítrico utilizando os resíduos do
processamento da laranja. / Bruno Arruda Martins. -
Rio de Janeiro, 2024.
100 f.

 Orientador: Fábio de Almeida Oroski.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2024.

 1. Ácido cítrico. 2. Resíduos da laranja. 3.
Viabilidade econômica. I. Oroski, Fábio de Almeida,
orient. II. Título.

BRUNO ARRUDA MARTINS

ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA PLANTA DE ÁCIDO
CÍTRICO UTILIZANDO OS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA LARANJA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 06 de fevereiro de 2024.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc., UFRJ

Flávia Chaves Alves, D.Sc., UFRJ

Leonardo Vieira Teixeira, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Valéria e Cláudio, e minha irmã, Nanda, por todo o suporte e senso de responsabilidade ao longo destes anos passados dentro do curso de Engenharia Química da UFRJ.

À minha namorada, Isabela, por estar sempre ao meu lado, sendo um exemplo, me motivando e me ajudando em qualquer situação.

Aos meus amigos que conheci no primeiro dia de Fundão e estiveram juntos comigo tornando todo esse tempo mais leve. Especialmente, Duda, Julia e Ceifa. Sem eles não teria acontecido.

Ao meu orientador Fábio Oroski pelo apoio, conselhos, e compreensão durante todo o processo de desenvolvimento, não só deste trabalho, mas também durante a pesquisa de Iniciação Científica que desenvolvemos juntos, estando sempre presente e disposto a me guiar pelo melhor caminho.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e à Escola de Química pela oportunidade de estudar em um ambiente plural e que valoriza a ciência e o conhecimento, onde vivenciei diversas experiências e emoções que me formaram a pessoa e profissional que sou hoje.

E a todos que contribuíram de alguma forma na minha formação ao longo deste período, direta ou indiretamente.

RESUMO

ARRUDA MARTINS, Bruno. **Estudo De Pré-Viabilidade Econômica De Uma Planta De Ácido Cítrico Utilizando Os Resíduos Do Processamento Da Laranja**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Globalmente, há uma crescente demanda por abordagens que conciliem desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental, especialmente com foco no reaproveitamento de resíduos. No Brasil, o setor citrícola já está amplamente consolidado e desempenha um papel significativo na economia brasileira e no cenário citrícola mundial, mas em contrapartida, enfrenta desafios relacionados à elevada geração de resíduos, sobretudo durante o processamento de laranjas para a produção de suco. Nesse contexto, o presente trabalho se insere com o propósito de explorar uma solução inovadora para a destinação desses resíduos, alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular. Nesse sentido, foi definido como objeto de estudo a pré-viabilidade econômica da instalação de uma planta produtora de ácido cítrico a partir do processamento dos resíduos da laranja, concebida para atender à demanda interna do país, substituindo importações e promovendo a valorização dos resíduos da indústria citrícola. A localização da planta foi determinada no município de Matão, no estado de São Paulo, região na qual encontram-se as maiores produtoras de suco do país. No cenário base, chegou-se a um Valor Presente Líquido (VPL) igual a R\$54.995.224,51, com Taxa Interna de Retorno (TIR) igual a 14,70% e um período de retorno do investimento (payback) de 14,70 anos. Posteriormente, ao recalcular os indicadores de viabilidade nas análises de viabilidade, concluiu-se que o projeto é bastante sensível às variações no preço de aquisição dos resíduos, no preço de venda do ácido cítrico e no investimento necessário ao projeto. Como resultado, obteve-se que o projeto, apesar de se mostrar economicamente viável, apresenta fragilidades consideráveis nas condições estabelecidas para a unidade, uma vez que não resolve a questão do resíduo. Dessa forma, faz-se necessário viabilizar e implementar oportunidades de aproveitamento dos resíduos gerados durante o processo produtivo do ácido cítrico. Além disso, considerar a abordagem das biorrefinarias revela-se decisivo, pois permite o processamento de diversos tipos de resíduos, resultando na produção de uma ampla gama de produtos de alto valor agregado.

Palavras-chave: ácido cítrico. resíduos. laranja.

ABSTRACT

ARRUDA MARTINS, Bruno. **Estudo De Pré-Viabilidade Econômica De Uma Planta De Ácido Cítrico Utilizando Os Resíduos Do Processamento Da Laranja**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Globally, there is a growing demand for approaches that reconcile economic development with environmental sustainability, especially focusing on waste reuse. In Brazil, the citrus sector is already well-established and plays a significant role in the Brazilian economy and the global citrus scenario. However, it faces challenges related to the high generation of waste, particularly during the processing of oranges for juice production. In this context, this study aims to explore an innovative solution for the disposal of these residues, aligned with the principles of bioeconomy and circular economy. In this sense, the economic viability of establishing a plant producing citric acid from orange waste was defined as the object of study. The plant is designed to meet the country domestic demand, replace imports, and promote the valorization of citrus industry waste. The location of the plant was determined in the municipality of Matão, in the state of São Paulo, the region with the largest juice producers in the country. In the base scenario, a Net Present Value (NPV) of R\$54,995,224.51 was reached, with an Internal Rate of Return (IRR) of 14.70% and a payback period of 14.70 years. Subsequently, upon recalculating the viability indicators in the analyses, it was concluded that the project is highly sensitive to variations in the acquisition price of waste, the selling price of citric acid, and the investment required for the project. As a result, the project, despite being economically viable, proves to be unattractive under the established conditions for the unit, as it does not address the waste issue. Thus, it is necessary to enable and implement opportunities to utilize the waste generated during the citric acid production process. Furthermore, considering the approach of biorefineries is crucial, as it allows the processing of various types of waste, resulting in the production of a wide range of high-value-added products.

Keywords: citric acid. wastes. orange.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 - Estrutura da laranja | 27 |
| Figura 2 - Estrutura química da molécula de Ácido Cítrico | 28 |
| Figura 3 - Processo de produção do farelo de polpa cítrica..... | 42 |
| Figura 4 - Diagrama de blocos do processo de obtenção do ácido cítrico | 45 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Destinação da laranja produzida nos principais países produtores | 24 |
| Gráfico 2 - Produção de laranja em 2022 no estado de São Paulo por município | 25 |
| Gráfico 3 - Localização das fábricas de processamento de suco de laranja no estado de São Paulo | 26 |
| Gráfico 4 - Mercado de ácido cítrico: tamanho do mercado (%), por geografia, global, 2022 | 33 |
| Gráfico 5 - Produção e Vendas declaradas (ton/ano)..... | 34 |
| Gráfico 6 - Preço médio de importação e exportação por kg de ácido cítrico no Brasil | 36 |
| Gráfico 7 - Componentes dos gastos totais de produção | 69 |
| Gráfico 8 - Componentes do custo fixo | 70 |
| Gráfico 9 - Componentes do custo variável..... | 73 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Aplicações do Ácido Cítrico | 31 |
| Quadro 2 - Correlações empíricas para estimação de Investimento Total | 50 |
| Quadro 3 - Cronograma Típico de Inicialização..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-------|
| Tabela 1 - Produção de laranja em 2022 no Brasil por unidade federativa..... | Erro! |
| Indicador não definido. | |
| Tabela 2 - Produção de laranja em 2022 no Brasil por região | 24 |
| Tabela 3 - Propriedades do Ácido Cítrico | 29 |
| Tabela 4 - Capacidade Instalada de plantas de ácido cítrico encontradas na literatura | 33 |
| Tabela 5 - Importação e exportação de ácido cítrico no Brasil | 35 |
| Tabela 6 - Balanço de massa do processo | 48 |
| Tabela 7 - Estimativa do investimento fixo a partir do custo dos equipamentos principais..... | 51 |
| Tabela 8 - Estimativa do investimento fixo do projeto | 68 |
| Tabela 9 - Correlações empíricas para estimação de Investimento Total | 68 |
| Tabela 10 - Componentes gastos totais de produção..... | 69 |
| Tabela 11 - Componentes do custo fixo..... | 70 |
| Tabela 12 - Estimativa do custo de mão de obra total | 71 |
| Tabela 13 - Componentes do custo variável..... | 72 |
| Tabela 14 - Estimativa do custo de matéria-prima | 74 |
| Tabela 15 - Estimativa do custo de disposição das saídas do processo | 75 |
| Tabela 16 - Estimativa das receitas do projeto..... | 76 |
| Tabela 17 - Demonstrativo de Resultado em Exercício (DRE)..... | 77 |
| Tabela 18 - Demonstrativo de Fluxo de Caixa (DFC)..... | 78 |
| Tabela 19 - Indicadores de viabilidade econômica..... | 79 |
| Tabela 20 - Sensibilização do preço de aquisição dos resíduos da laranja | 81 |
| Tabela 21 - Sensibilização do preço de venda do ácido cítrico..... | 82 |
| Tabela 22 - Sensibilização do Investimento Fixo do projeto | 84 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABBI | Associação Brasileira de Bioinovação |
| ABIQUIM | Associação Brasileira da Indústria Química |
| ADM | Archer Daniels Midland Company |
| CAGR | Compound Annual Growth Rate |
| CCO | Custos de Consumíveis |
| CDS | Custos de Disposição de Subprodutos |
| CEPCI | Chemical Engineering Plant Cost Index |
| CFP | Custos Fixos de Produção; |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CMP | Custos com Matéria-Prima |
| CSSL | Contribuição Social sobre o Lucro Líquido |
| CTP | Custos Totais de Produção; |
| CUT | Custos de Utilidades |
| CVP | Custos Variáveis de Produção; |
| DFC | Demonstrativos de Fluxo de Caixa |
| DRE | Demonstrativos de Resultado em Exercício |
| EBIT | Earnings Before Interest and Taxes |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) |
| FAO | Food and Agriculture Organization |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IPCA | Índice de Preços ao Consumidor Amplo |
| ISBL | Inside Battery Limits Plant Cost |
| IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry |
| IRPJ | Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OSBL | Outside Battery Limits Plant Cost |
| PDA | Potato Dextrose Agar |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| TIR | Taxa Interna de Retorno |
| TMA | Taxa Mínima de Atratividade |
| USDA | United States Department of Agriculture |
| VPL | Valor Presente Líquido |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 Reaproveitamento de resíduos, bioeconomia e economia circular: Transformando Resíduos em Recursos | 19 |
| 2.2 A produção de laranja no Brasil e os desafios da gestão de resíduos na indústria citrícola | 22 |
| 2.3 O Ácido Cítrico | 28 |
| 2.3.1 O Mercado do Ácido Cítrico | 31 |
| 2.3.2 Rotas de Produção do Ácido Cítrico | 38 |
| 2.3.2.1 Rota bioquímica para a produção de Ácido Cítrico | 38 |
| 2.3.2.1.1 Fermentação em superfície | 39 |
| 2.3.2.1.2 Fermentação submersa | 40 |
| 2.3.2.1.3 Fermentação em estado sólido | 40 |
| 2.3.3 Matérias-Primas | 41 |
| 2.4 Produção de Ácido Cítrico a partir dos resíduos do processamento da laranja | 42 |
| 3 METODOLOGIA | 47 |
| 3.1 Estimativa de Investimento | 49 |
| 3.2 Estimativa de Custos de Produção | 52 |
| 3.2.1 Custos Fixos de Produção | 52 |
| 3.2.1.1 Custos de Mão-de-Obra | 52 |
| 3.2.1.2 Custos de Manutenção | 54 |
| 3.2.1.3 Custos com Seguro | 54 |
| 3.2.2 Custos Variáveis de Produção | 54 |
| 3.2.2.1 Custos de Matéria-Prima | 55 |
| 3.2.2.2 Custos de disposição de subprodutos do processo | 55 |
| 3.2.2.3 Custos de Utilidades e Consumíveis | 56 |
| 3.2.3 Despesas Operacionais | 57 |
| 3.2.4 Imposto de Renda | 58 |
| 3.2.3 Depreciação | 58 |
| 3.3 Estimativa de Receitas | 59 |
| 3.4 Elaboração das Demonstrações Contábeis | 59 |
| 3.5 Indicadores de viabilidade econômica | 60 |
| 3.6 Análise de Sensibilidade | 62 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 64 |
| 4.1 Escolha da Localização | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2 Estimativa de Investimento..... | 65 |
| 4.3 Estimativa de Custos de Produção..... | 69 |
| 4.3.1 Custos Fixos de Produção..... | 70 |
| 4.3.1.1 Custos de Mão-de-Obra..... | 71 |
| 4.3.1.2 Custos de Manutenção..... | 72 |
| 4.3.1.3 Custos com Seguro..... | 72 |
| 4.3.2 Custos Variáveis de Produção..... | 72 |
| 4.3.2.1 Custos de Matéria-Prima..... | 73 |
| 4.3.2.2 Custos de disposição de subprodutos do processo..... | 74 |
| 4.3.2.3 Custos de Utilidades e Consumíveis..... | 75 |
| 4.3.3 Despesas Operacionais..... | 75 |
| 4.4 Estimativa de Receitas..... | 76 |
| 4.5 Elaboração das Demonstrações Contábeis..... | 76 |
| 4.6 Indicadores de viabilidade econômica..... | 79 |
| 4.7 Análise de Sensibilidade..... | 80 |
| 4.7.1 Sensibilização do preço de aquisição dos resíduos..... | 81 |
| 4.7.2 Sensibilização do preço de venda do ácido cítrico..... | 82 |
| 4.7.3 Sensibilização do Investimento Fixo do projeto..... | 84 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 86 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 89 |

1 INTRODUÇÃO

No mundo aumentam as pressões por soluções que conciliem desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental. Nesta perspectiva, a bioeconomia, a qual compreende toda atividade econômica derivada de bioprocessos e bioprodutos que contribui para soluções eficientes no uso de recursos biológicos, surge como uma grande oportunidade para a geração de novos negócios a partir de inovações e tecnologias que aproveitem o potencial de biomassa e resíduos gerados ao longo da cadeia dos sistemas alimentares (EMBRAPA, 2023).

No relatório *Driven to Waste: The Global Impact of Food Loss and Waste on Farms*, de 2021, a WWF (World Wildlife Fund for Nature) estima que 1,2 bilhão de toneladas de alimentos são perdidas no campo, durante e após a colheita. Isso equivale a 15,3% dos alimentos produzidos. Estima-se que a perda total de alimentos, do campo até o consumidor, seja superior a 2,5 bilhões de toneladas, aproximadamente 40% de todos os alimentos produzidos.

À medida que a sociedade enfrenta desafios ambientais e econômicos crescentes, a valorização de resíduos emerge como uma oportunidade para transformar problemas em soluções. Na prática, isso significa repensar a forma como os produtos são projetados, produzidos e descartados. Na lógica circular, produtos são projetados para serem desmontados e reciclados, e a recuperação de materiais torna-se uma prioridade. Em contraste, na economia linear, produtos são concebidos para serem utilizados e descartados, sem considerar o reaproveitamento de materiais ou a minimização de resíduos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2023). A economia circular preconiza a transformação de resíduos em recursos úteis, criando uma abordagem sistêmica para a gestão de resíduos e a conservação de recursos (KLITKOU, FEVOLDEN & CAPASSO, 2019).

Diante da crescente pressão por práticas sustentáveis e da combinação de biodiversidade, solidez do agronegócio, avanços tecnológicos e investimentos em bioindústrias, a bioeconomia representa uma das melhores oportunidades para o desenvolvimento do Brasil. De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a bioeconomia movimentou no mercado mundial 2 trilhões de Euros e gera cerca de 22 milhões de empregos. Estudos da organização apontam que a bioeconomia responderá, até 2030, por 2,7% do Produto Interno Bruto (PIB) dos seus países membros, percentual que poderá ser ainda maior em países como o Brasil, que dispõe de grande biodiversidade para fortalecer as cadeias produtivas que utilizam os recursos naturais de forma sustentável e consciente (OCDE, 2009).

Há, entretanto, uma lacuna em estudos para identificar e avaliar oportunidades locais no desenvolvimento da bioeconomia, principalmente com foco em resolver a questão do resíduo – que neste caso deixa de ser visto como resíduo e passa a ser visto como recurso – visando criar soluções para problemas frequentemente ignorados pela lógica dominante dos grandes empreendimentos econômicos. Nesse contexto, muitas oportunidades podem ser geradas para solucionar, especialmente, problemas locais, concentradas em áreas com alto índice de perda, como, por exemplo, nas proximidades de fazendas ou indústrias.

O Brasil é líder global na produção de laranja e suco concentrado, contribuindo substancialmente para a economia do país. De acordo com a Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos (CitrusBR), a laranja é a fruta mais cultivada no país, com 800 mil hectares plantados. A relevância da produção brasileira de laranja é tão significativa que se estima que o país seja responsável pela produção de três a cada cinco copos de suco de laranja consumidos no mundo, consolidando sua posição de destaque no mercado (CITRUSB, 2020).

Por outro lado, ao longo da cadeia produtiva da laranja no Brasil, apenas metade da massa processada é efetivamente transformada em suco concentrado, enquanto a outra metade constitui resíduo de processo, gerando mais de 7 milhões de toneladas de resíduos anualmente (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012).

Para mitigar os impactos ambientais associados à disposição final desses resíduos, é essencial submetê-los a tratamento adequado, alinhado a estratégias de valorização desses recursos. Embora haja atualmente várias tecnologias em desenvolvimento para o reaproveitamento desses resíduos, é importante destacar que, até relativamente pouco tempo atrás, não existiam métodos de descarte satisfatórios. Os principais métodos utilizados incluíam o despejo dos resíduos em áreas adjacentes aos locais de produção, a utilização dos resíduos como matéria-prima na produção de ração para agropecuária ou a queima dos mesmos (MARTÍN et al., 2010; LAPUERTA et al., 2008). No entanto, esses processos ainda apresentam um alto potencial poluidor e negligenciam o aproveitamento integral desses resíduos.

Entre as principais regiões produtoras estão São Paulo e Minas Gerais, com 78% e 6% da produção nacional, respectivamente, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023). Juntos, os estados formam o principal cinturão citrícola do mundo. Dessa forma, nessa região está concentrada uma enorme quantidade de resíduos, representando uma grande oportunidade de criação de um novo negócio local que gere empregos, movimente a economia e ainda resolva a problemática do resíduo.

Nesse cenário, o presente trabalho se insere com o propósito de explorar uma solução inovadora e neste local onde há uma expressiva quantidade de resíduos sendo gerados diariamente. Ao adotar uma perspectiva da bioeconomia, o trabalho propõe

a transformação dos resíduos da produção de laranja em um recurso valioso. Esta abordagem não apenas busca preencher a lacuna existente na aplicação prática da bioeconomia em âmbito local, mas também contribui para alterar a percepção tradicional dos resíduos, conferindo-lhes uma nova função como matéria-prima essencial.

Diversas pesquisas têm explorado alternativas para o aproveitamento dos resíduos de laranja, propondo sua utilização na produção de fertilizantes orgânicos, pectina, óleos essenciais, compostos antioxidantes, bem como como substratos para a geração de diversos compostos de elevado valor agregado, como proteínas microbianas, ácidos orgânicos, etanol e enzimas (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012; SUZUKI, 2019).

Diante da oportunidade de rentabilização dos resíduos provenientes do processamento da laranja, este estudo tem como objetivo geral realizar uma análise preliminar da viabilidade econômica para a implementação de uma unidade industrial voltada à produção de ácido cítrico a partir desses resíduos. Como objetivos específicos, este trabalho se propõe a:

- Entender o panorama dos setores envolvidos na temática central desse estudo. Para isso, será conduzida uma revisão bibliográfica sobre:
 - A temática do resíduo, explorando os conceitos de economia circular e bioeconomia;
 - A produção de laranja no Brasil e os desafios da gestão de resíduos na indústria citrícola;
 - O ácido cítrico, sua origem e aplicações, o mercado mundial e brasileiro, e as principais tecnologias envolvidas em sua produção.
- Elucidar o processo de produção de ácido cítrico a partir dos resíduos do processamento da laranja;
- Identificar os investimentos principais e os custos operacionais essenciais para o funcionamento da planta, bem como as receitas provenientes desta operação;
- Realizar análises de sensibilidade para avaliar as variáveis que têm maior impacto na viabilidade do projeto;

A escolha pelo ácido cítrico como foco deste estudo pode ser justificada por sua notável versatilidade de aplicações, como será apresentado na seção 2.3, abrangendo uma vasta variedade de potenciais clientes e setores industriais interessados em um produto que ainda é amplamente importado no Brasil. Em uma entrevista ao portal da revista Química e Derivados, em 2022, Marisa Camacho Gemelgo, diretora comercial da Nicrom Química, uma empresa brasileira especializada na importação, distribuição, comercialização e logística de produtos e matérias-primas, destacou que o mercado dependia significativamente de produtos importados para atender à demanda interna. Contudo, com a regressão causada pela pandemia de COVID-19, houve o aumento

dos custos de frete internacional e flutuações nas taxas de câmbio. Assim, muitos fornecedores passaram a enfrentar desafios na importação, resultando em uma maior necessidade por produtos nacionais. Esta mudança no cenário de abastecimento gerou dificuldades de atendimento por parte dos produtores locais, contribuindo para um aumento nos preços do produto. Dessa forma, a escolha estratégica de investigar a viabilidade econômica do ácido cítrico está diretamente relacionada aos desafios e oportunidades de substituição de importação presentes no contexto atual do mercado nacional.

A avaliação será conduzida por meio da elaboração de Demonstrativos de Resultado em Exercício (DRE) e Demonstrativos de Fluxo de Caixa (DFC), baseados em estimativas de custos e investimentos necessários para a instalação da planta. Além disso, serão calculados indicadores de viabilidade, tais como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e payback. O estudo também se propõe a identificar as variáveis que mais impactam na avaliação de viabilidade econômica, utilizando análise de sensibilidade para analisar o efeito de variações em variáveis-chave nos indicadores mencionados anteriormente.

A primeira parte deste trabalho engloba uma revisão bibliográfica acerca da questão do resíduo dentro da perspectiva da bioeconomia e economia circular; depois uma contextualização do cenário de laranja no Brasil, abordando sua localização e a representatividade do país na produção e exportação de suco de laranja; e por fim, do ácido cítrico, abordando o mercado desse produto e suas rotas de produção. Em seguida, são apresentados os principais resíduos associados à produção de suco de laranja, bem como as tecnologias disponíveis para o reaproveitamento desses resíduos na produção de ácido cítrico, mostrando o diagrama de blocos do processo. A segunda parte do trabalho concentra-se na análise de pré-viabilidade econômica de uma unidade de produção de ácido cítrico a partir dos resíduos da indústria do suco de laranja. Os resultados das análises e cálculos são expostos juntamente com discussões embasadas nas análises de sensibilidade. Por fim, a pesquisa é encerrada com uma seção dedicada às conclusões, suas limitações e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reaproveitamento de resíduos, bioeconomia e economia circular: Transformando Resíduos em Recursos

A busca por alternativas sustentáveis na gestão de recursos e resíduos tem se tornado cada vez mais relevante diante dos desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à escassez de recursos naturais. Nesse contexto, a bioeconomia e a economia circular emergem como conceitos-chave que oferecem diretrizes inovadoras para abordar essas questões de forma integrada, alinhando-se diretamente com os a meta 12.5 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), a qual visa reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso até 2030 (IPEA, 2023).

A bioeconomia é um conceito que envolve a utilização de recursos biológicos, como biomassa, de forma sustentável para a produção de uma ampla gama de produtos, desde alimentos e bioplásticos até produtos químicos e biocombustíveis (KLITKOU, FEVOLDEN & CAPASSO, 2019).

São diversas as definições para a bioeconomia, entre as quais destaca-se a definição dada pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE no relatório *'Oportunidades e Desafios da Bioeconomia'*: *"A bioeconomia compreende toda atividade econômica derivada de bioprocessos e bioprodutos que contribui para soluções eficientes no uso de recursos biológicos, tendo em vista os desafios em alimentação, produtos químicos, produção de energia, saúde, serviços ambientais e proteção ambiental, promovendo a transição para um novo modelo de desenvolvimento sustentável e bem estar da sociedade"*. Por essa definição, nota-se que o uso de matérias-primas renováveis é central, assim como a geração de inovações e oportunidades para novos negócios. Além disso, o aproveitamento de resíduos também insere a economia circular como pilar para o desenvolvimento da bioeconomia.

A economia circular se refere a um sistema econômico que tem como meta zerar os resíduos e poluição ao longo dos ciclos de vida dos materiais, desde a extração dos recursos até a transformação industrial e junto aos consumidores finais, sendo aplicada a todos os ecossistemas envolvidos (NOBRE, 2021). Destaca-se a necessidade de repensar o modelo linear de produção e consumo e adotar princípios da economia circular. A economia circular se concentra em fechar o ciclo de vida dos produtos, minimizar o desperdício e maximizar o reaproveitamento de materiais, contribuindo para a sustentabilidade (KLITKOU, FEVOLDEN & CAPASSO, 2019).

A valorização de subprodutos e resíduos é uma manifestação direta da economia circular, que visa a minimização do desperdício e a máxima eficiência no uso de recursos. Um exemplo é a valorização de subprodutos do processamento de alimentos, como cascas, bagaços, farelos e resíduos agrícolas, para a produção de ingredientes alimentares, bioplásticos e produtos químicos. São recursos naturais renováveis e produzidos em grandes quantidades, o que, algumas vezes, faz com que se tornem um problema ambiental se não houver uma destinação final adequada (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014).

A interseção da bioeconomia e da economia circular representa uma jornada em direção a uma sociedade mais sustentável. Nesta interseção encontra-se o conceito de bioeconomia circular, a qual concentra-se na valorização sustentável e eficiente de recursos da biomassa em cadeias de produção integradas e com múltiplas saídas, por exemplo, em biorrefinarias, fazendo uso de resíduos para otimizar o valor da biomassa ao longo do tempo por meio de uma abordagem em cascata, isto é, o uso sequencial de recursos para diferentes finalidades (STEGMANN, LONDO & JUNGINGER, 2020). A transformação de resíduos em recursos não apenas contribui para a redução do desperdício e o uso eficiente de recursos, mas também promove a inovação e a criação de oportunidades econômicas. Como componente central dessa visão, a biomassa desempenha um papel crucial ao transformar os fluxos residuais em insumos valiosos (ABBI, 2022).

Várias projeções sobre o potencial de desenvolvimento dos chamados bioprodutos têm sido realizadas por governos, institutos de pesquisa, consultorias e empresas. Tais projeções apontam grande potencial de geração de oportunidades (ABBI, 2022), tanto para firmas emergentes quanto para firmas estabelecidas, que atuam em mercados como a produção de petroquímicos, químicos, alimentos etc. Um grande e sustentável mercado tem sido previsto para tecnologias de produção de produtos químicos, materiais e medicamentos à base de biomassa (E4tech, RE-CORD & WUR, 2015). Tal desenvolvimento deverá ser apoiado por etapas de processamento energeticamente eficientes e de baixo custo (LANGEVELD & DIXON, 2010; LANGEVELD et al., 2010).

No contexto brasileiro, o relatório "A bioeconomia brasileira em números" do BNDES, de 2018, destaca que o desenvolvimento da bioeconomia se apresenta como uma oportunidade promissora para o país, devido às vantagens significativas que este possui, as quais podem ser exploradas. O Brasil é conhecido por sua ampla biodiversidade – com mais de 100 mil espécies animais e cerca de 45 mil vegetais conhecidas –, abrigando a maior variedade de espécies vegetais do mundo em diversos biomas, como a Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa, Caatinga e Pantanal. Essa riqueza biológica é uma fonte valiosa de matérias-primas para uma ampla gama de indústrias, incluindo biocombustíveis, corantes, óleos vegetais, fitoterápicos, antioxidantes e óleos essenciais para setores como higiene, alimentos, bebidas, farmacêutica e cosmético (EMBRAPA, 2023).

Embora o tema bioeconomia esteja em evidência nos cenários nacional e internacional como estratégia para o alcance do desenvolvimento sustentável e geração de inovações e oportunidades econômicas, no Brasil a bioeconomia ainda não possui uma política nacional específica (LOPES & CHIAVARI, 2022). Apesar disso, o país desponta como uma das regiões de maior desenvolvimento e potencial para a bioeconomia.

O estudo “Identificação das Oportunidades e o Potencial do Impacto da Bioeconomia para a Descarbonização do Brasil”, de 2022, da Associação Brasileira de Bioinovação (ABBI) em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Laboratório Nacional de Biorrenováveis do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (LNBR/CNPEN), Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (SENAI/CETIQT) e o Laboratório Cenergia/UFRJ, conclui que ao integrar a gestão eficaz de resíduos à dinâmica da bioeconomia, o Brasil se posiciona como um protagonista na transição para modelos mais sustentáveis e resilientes, onde a biomassa, antes considerada resíduo, torna-se um recurso estratégico para impulsionar uma produção mais eficiente e amiga do meio ambiente. O levantamento prevê que a implementação da bioeconomia no país pode gerar um faturamento industrial anual de US\$592,6 bilhões ao ano (ABBI, 2023).

O desafio, então, reside em otimizar a utilização desses resíduos, transformando-os em fontes de valor econômico. E nesse contexto, as soluções de biomanufatura para a conversão de biomassa em produtos de alto valor agregado representam um marco nesse cenário (ABBI, 2022). Essas tecnologias não apenas viabilizam a utilização completa da biomassa, mas também redefinem a relação com resíduos que, anteriormente, seriam descartados ou utilizados de maneira ineficiente.

Diversos atores estão envolvidos no campo da bioeconomia, incluindo instituições governamentais, instituições de ensino e pesquisa, empresas de diferentes portes e consumidores que buscam produtos sustentáveis. A coordenação entre esses atores desempenha um papel crucial na superação dos desafios atuais, incluindo questões regulatórias (SILVA et al., 2018).

Uma mudança positiva relativamente recente foi a promulgação da Lei da Biodiversidade – Lei 13.123/2015 – (BRASIL, 2015), cujo propósito é estabelecer diretrizes para a condução de pesquisas e iniciativas de desenvolvimento relacionadas ao patrimônio genético das espécies que compõem a biodiversidade brasileira, assim como os saberes tradicionais a ela ligados. Essa legislação visa fomentar a utilização sustentável desses recursos e garantir uma repartição justa e equitativa dos benefícios derivados dessas ações (FERREIRA et al., 2021).

Em síntese, a valorização de resíduos não apenas reduz o impacto ambiental, mas também cria oportunidades para a geração de empregos e o fortalecimento de cadeias

produtivas sustentáveis com potencial de reverter o desafio de uma balança comercial negativa, sobretudo diante da realidade atual do Brasil, que de acordo com a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUM), até novembro de 2023, apresentou um déficit expressivo na balança comercial de produtos químicos, alcançando US\$ 43,3 bilhões. No período, as importações somaram US\$56,7 bilhões, enquanto as vendas ao exterior ficaram em US\$13,4 bilhões (MERCADO E CONSUMO, 2023). Sendo assim, o desenvolvimento de tecnologias eficientes e de baixo custo, como aquelas necessárias para a produção de ácido cítrico a partir de resíduos de processamento de laranja, destaca-se como um exemplo tangível dessa transformação.

À medida que se avança para uma bioeconomia mais robusta e uma economia circular mais integrada, a conscientização, a cooperação e o engajamento de todos os envolvidos ao longo da cadeia do sistema alimentar são elementos cruciais. A compreensão de que os resíduos podem ser potenciais fontes de riqueza e inovação destaca-se como um princípio orientador, indicando que a jornada em direção a uma sociedade mais sustentável é, sem dúvida, uma responsabilidade compartilhada e uma oportunidade para transformar desafios em soluções viáveis. Na sequência, será explorado detalhadamente o potencial da laranja como fonte significativa de biomassa, desdobrando as possibilidades que este estudo se propõe a investigar.

2.2 A produção de laranja no Brasil e os desafios da gestão de resíduos na indústria citrícola

A laranja é uma fruta cítrica amplamente consumida em todo o mundo, seja na sua forma natural, descascada ou na forma de suco. É conhecida por ser uma opção de baixo custo e é uma excelente fonte de nutrientes essenciais, incluindo vitaminas C, A e B, minerais como cálcio, fósforo e potássio, além de fibras dietéticas (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012).

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de laranja e o seu cultivo está presente em todos os estados, abrangendo uma área de mais de 800 mil hectares, ocupando uma extensão de terra que é 20 vezes maior do que os pomares de maçã, 10 vezes maior do que os de manga, uva e quase o dobro da área destinada ao cultivo de banana. Além disso, a produção de laranja tem se expandido para além de São Paulo, que detém 70% da área de plantio (FAESP, 2022). Estados como Bahia, Sergipe, Paraná, Alagoas, Goiás, Pará, Amapá e Acre estão atendendo a uma crescente demanda por laranjas frescas nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil que pode ser visto nos dados do IBGE a seguir.

A Tabela 1 e 2 a seguir mostram dados da produção de laranja no território nacional por unidade federativa e regiões, respectivamente, no ano de 2022:

Tabela 1 - Produção de laranja em 2022 no Brasil por unidade federativa

| Unidade Federativa | Valor da produção (reais) | Quantidade produzida (ton) | Área colhida (ha) | Estabelecimentos |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|
| Acre | 6.548.000 | 6.699 | 469 | 237 |
| Alagoas | 186.363.000 | 132.369 | 11.177 | 3.417 |
| Amapá | 4.954.000 | 3.620 | 590 | 264 |
| Amazonas | 44.684.000 | 22.027 | 1.233 | 1.307 |
| Bahia | 387.590.000 | 575.226 | 48.874 | 14.765 |
| Ceará | 11.384.000 | 8.460 | 952 | 411 |
| Distrito Federal | 1.616.000 | 1.010 | 50 | 39 |
| Espírito Santo | 44.064.000 | 24.182 | 1.817 | 1.669 |
| Goiás | 181.488.000 | 163.230 | 7.024 | 276 |
| Maranhão | 262.000 | 366 | 76 | 64 |
| Mato Grosso | 8.197.000 | 4.494 | 483 | 221 |
| Mato Grosso do Sul | 40.610.000 | 36.405 | 1.467 | 76 |
| Minas Gerais | 1.012.368.000 | 1.091.402 | 38.946 | 2.503 |
| Pará | 175.173.000 | 264.651 | 15.197 | 2.529 |
| Paraíba | 5.365.000 | 5.355 | 754 | 599 |
| Paraná | 679.385.000 | 658.147 | 20.930 | 993 |
| Pernambuco | 8.980.000 | 6.477 | 676 | 1.150 |
| Piauí | 2.687.000 | 1.575 | 182 | 97 |
| Rio de Janeiro | 110.355.000 | 63.683 | 4.691 | 1.572 |
| Rio Grande do Norte | 1.605.000 | 825 | 90 | 8 |
| Rio Grande do Sul | 369.360.000 | 357.259 | 21.100 | 7.997 |
| Rondônia | 7.352.000 | 3.801 | 372 | 341 |
| Roraima | 34.831.000 | 22.275 | 1.435 | 942 |
| Santa Catarina | 29.248.000 | 30.452 | 1.730 | 998 |
| São Paulo | 10.723.088.000 | 13.025.994 | 357.433 | 4.915 |
| Sergipe | 288.200.000 | 418.814 | 30.314 | 8.465 |
| Tocantins | 1.256.000 | 833 | 70 | 57 |
| Brasil (total) | 14.367.013.000 | 16.929.631 | 568.132 | 55.912 |

Fonte: IBGE, 2023

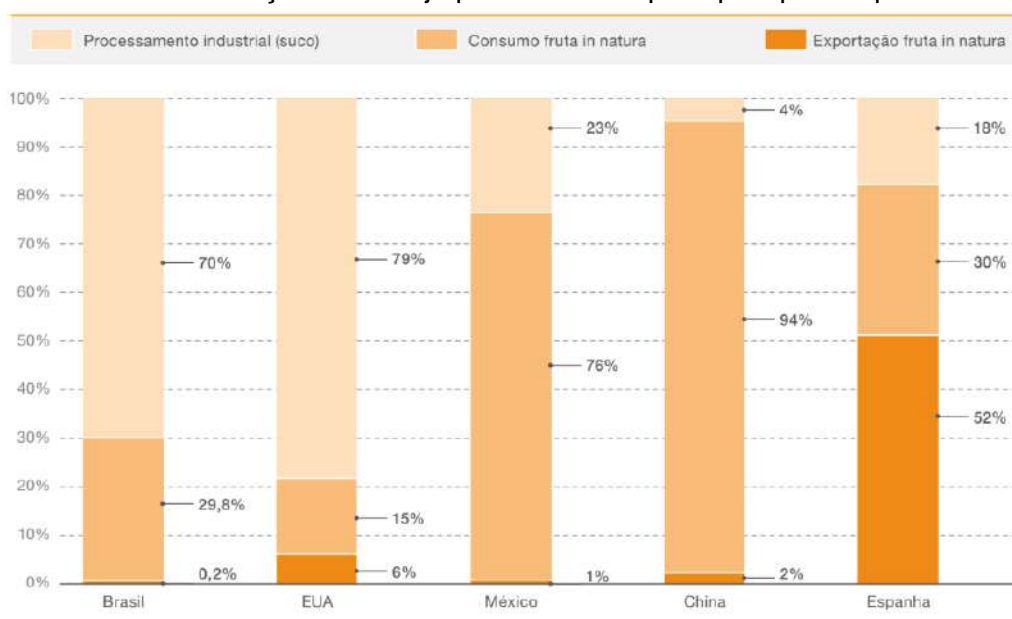
Tabela 2 - Produção de laranja em 2022 no Brasil por região

| Região | Valor da produção (reais) | Quantidade produzida (ton) | Área colhida (ha) | Estabelecimentos |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|
| Norte | 274.798.000 | 323.906 | 19.366 | 5.677 |
| Sul | 1.077.993.000 | 1.045.858 | 43.760 | 9.988 |
| Sudeste | 11.889.875.000 | 14.205.261 | 402.887 | 10.659 |
| Centro-Oeste | 231.911.000 | 205.139 | 9.024 | 612 |
| Nordeste | 892.436.000 | 1.149.467 | 93.095 | 28.976 |
| Brasil (total) | 14.367.013.000 | 16.929.631 | 568.132 | 55.912 |

Fonte: IBGE, 2023

A maior parte da produção nacional da fruta é direcionada para a indústria cítrica, como ilustrado no Gráfico 1. Segundo a Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos (CitrusBR), aproximadamente 85% das laranjas produzidas são destinadas à produção de suco industrializado, com apenas 15% sendo consumidas diretamente (PORTO, SFORÇA, & BULLER, 2021; NEVES, 2010). Além disso, estima-se que o suco de laranja brasileiro corresponda a metade do mercado global e que três a cada cinco copos de suco de laranja consumidos no mundo são originários do Brasil, que configura entre os maiores exportadores (NEVES, 2014).

Gráfico 1 - Destinação da laranja produzida nos principais países produtores

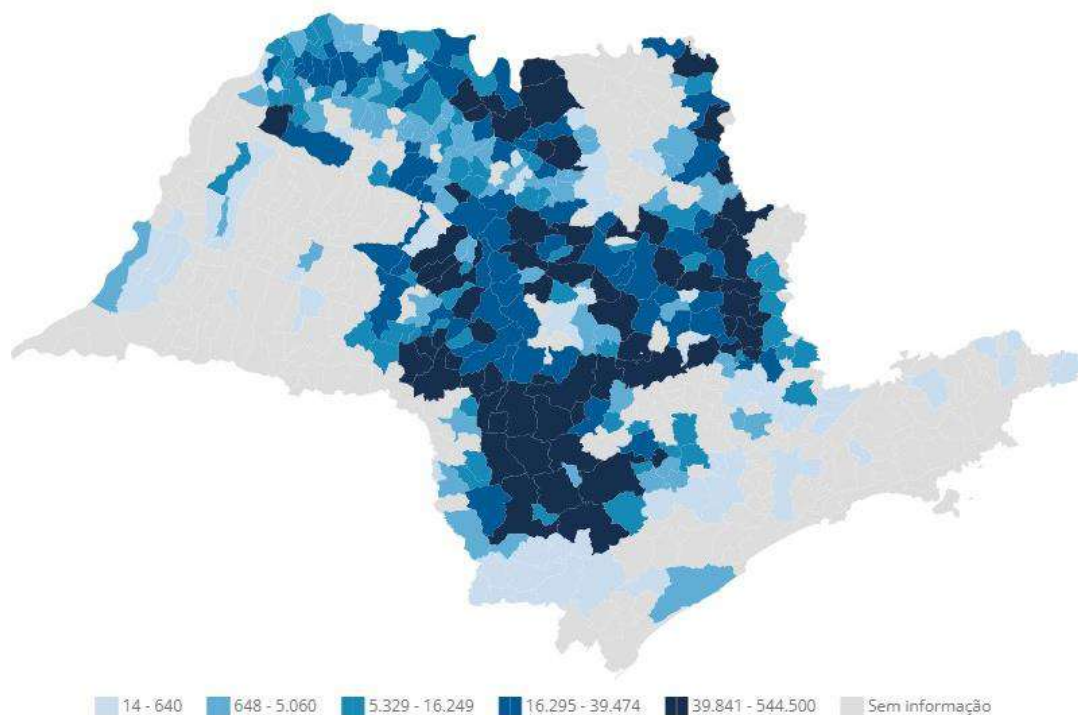


Fonte: NEVES, 2010

Diante dos dados apresentados, observa-se que São Paulo é, de longe, o estado que mais produz laranja no país, sendo responsável por quase 78% da produção, seguido

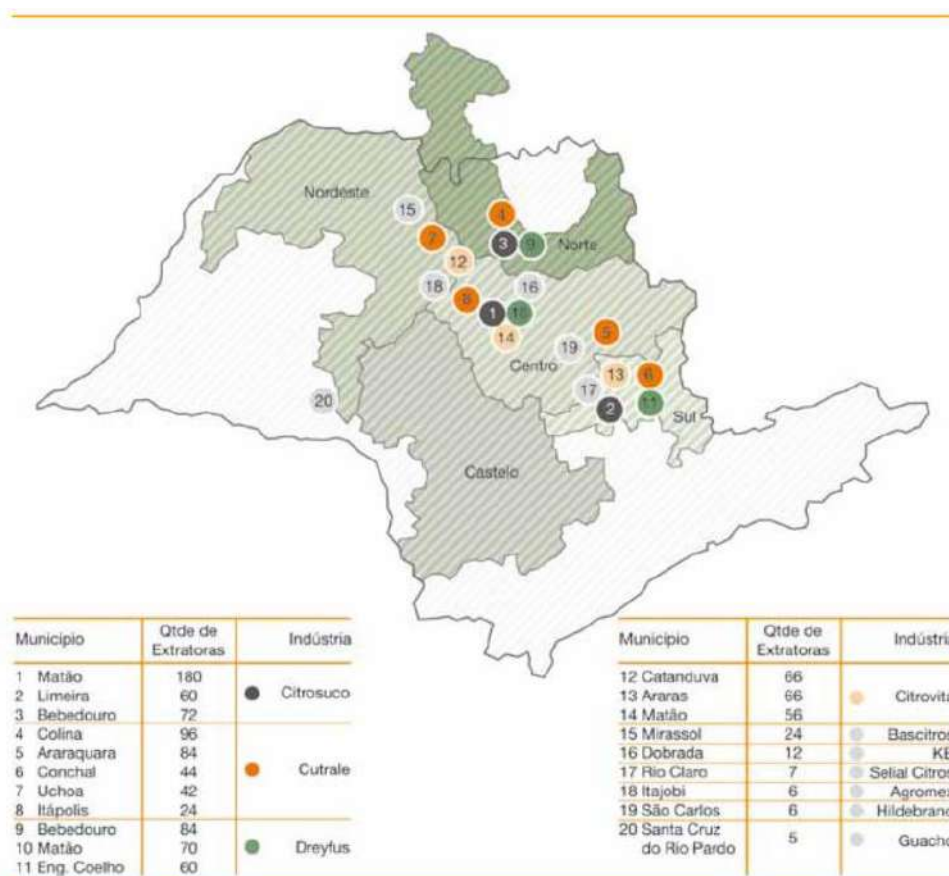
de seu estado vizinho, Minas Gerais (IBGE, 2023). Consequentemente, a produção de suco de laranja nessa região assume uma importância significativa. Os Gráficos 2 e 3 ajudam a ilustrar a relevância da produção paulista, reunindo a produção da fruta por município e as principais indústrias de processamento de suco de laranja no estado, respectivamente:

Gráfico 2 - Produção de laranja em 2022 no estado de São Paulo por município



Fonte: IBGE, 2023

Gráfico 3 - Localização das fábricas de processamento de suco de laranja no estado de São Paulo



Fonte: NEVES, 2010¹

A indústria de suco de laranja no Brasil, especialmente no cinturão agrícola de São Paulo e do Triângulo Mineiro, apresenta um perfil notavelmente concentrado e tecnológico e se destaca como uma das maiores cadeias agroindustriais do Brasil (SANTOS et al., 2013). A citricultura não apenas contribui substancialmente para a economia nacional, gerando renda, empregos e arrecadação de impostos, mas também mantém uma estrutura consolidada ao longo do tempo (KALAKI; NEVES, 2017). Dados do Caged (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados) divulgados pela Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos (CITRUSBR, 2020) indicam que, em 2015, a citricultura foi o segmento do agronegócio com maiores admissões.

Uma característica marcante é a concentração nas mãos de poucas empresas, uma realidade persistente ao longo da história do setor (PALMIERI, 2018). Desde os

¹ Ao longo dos últimos anos, foi observada uma movimentação dos principais atores da indústria citrícola na região. No entanto, devido à impossibilidade de atualizar este gráfico, ele está sendo empregado como uma representação visual histórica para ilustrar a tendência observada.

primeiros anos da produção de suco de laranja em São Paulo, a capacidade de processamento estava nas mãos de poucas empresas (ROSSI; TORKOMIAN, 2015). Pesquisas indicam que, entre 1975 e 1999, no máximo cinco empresas respondiam por mais de 75% da produção brasileira de suco de laranja (PAULILLO, 1999). Essa concentração se acentuou ao longo do tempo, chegando a um ponto em que, em 2015, apenas três empresas detinham 90% do mercado brasileiro: Cutrale, Citrosuco e Louis Dreyfus (SILVA; BARROS; BOTEON, 2017; ROSSI; TORKOMIAN, 2015). Essa concentração, aliada a avançadas tecnologias de processamento, define a indústria de suco de laranja no Brasil como altamente consolidada e eficiente (PALMIERI, 2018).

Devido à relevância desse setor no Brasil, a quantidade de resíduos gerados pela indústria também é considerável, representando cerca de metade do peso total da fruta, distribuídos entre casca, bagaço, semente e folhas (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012), provenientes das estruturas da fruta ilustradas na Figura 1.



Fonte: SUZUKI, 2019; TETRA PAK, 2018.

Na literatura, o subproduto resultante do processo de fabricação de suco de laranja é comumente chamado de "resíduo de casca de laranja" (DÁVILA; ROSENBERG; POURBAFRANI et al., 2010; SALAZAR; ALZATE, 2011), dado que o principal subproduto desse processamento são as cascas (20% em peso do total da fruta e 60% em peso do total de resíduos), que na maioria das vezes não recebem disposição final ambientalmente adequada, sem valorização energética, ou então destinadas para a alimentação animal (PORTO, SFORÇA, e BULLER, 2021; NEGRO, 2017).

A casca de laranja é composta por açúcares solúveis e amido (25% em peso), fibras (celulose, 9,21% em peso; hemiceluloses, 10,5% em peso; lignina, 0,84% em peso; e pectinas, 42,5% em peso), cinzas, 3,50% em peso; gorduras, 1,95% em peso; e proteínas, 6,50% em peso (SATHEESHKUMAR et al., 2019).

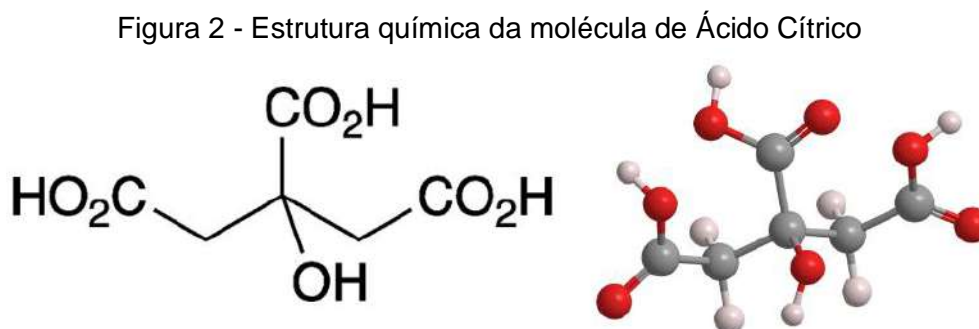
No geral, a destinação desses resíduos envolve a dispersão no solo de áreas próximas aos locais de produção, onde podem ser utilizados como matéria-prima na alimentação animal, ou, em alternativa, são submetidos à incineração (MARTÍN et al., 2010; LAPUERTA et al., 2008). No entanto, é importante observar que esse método de gestão de resíduos resulta na geração de efluentes altamente contaminados em termos de parâmetros químicos e de demanda biológica de oxigênio, o que pode causar impactos negativos no solo, nas águas subterrâneas e nas águas superficiais (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012).

Uma solução viável para aprimorar o gerenciamento desses resíduos envolve a implementação de novos processos visando à sua recuperação. Isso inclui a produção de fertilizantes orgânicos, fibra dietética, pectina, etanol, biogás, adsorventes, carotenóides, enzimas, óleos essenciais e ácidos orgânicos, como o ácido cítrico (SUZUKI, 2019). Essas alternativas representam meios eficazes de prevenir a poluição ambiental e, ao mesmo tempo, agregar valor a essas matérias-primas (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012).

2.3 O Ácido Cítrico

O ácido cítrico, também conhecido como citrato de hidrogênio, tem seu nome oriundo da palavra *citrus* em Latim, uma árvore cujos frutos se pareciam com os limões (MAX et al., 2010). O composto foi batizado dessa forma pois em 1784, o químico e farmacêutico alemão Carl Wilhelm Scheele conseguiu isolar, pela primeira vez, cristais de ácido cítrico justamente do suco de limões (ACS, 2022).

Sua nomenclatura oficial pelas regras da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) é ácido 2-hidroxi-1,2,3-propanotricarboxílico, cuja fórmula química $C_6H_8O_7$ se apresenta na estrutura química ilustrada na Figura 2 e algumas propriedades são exibidas do Tabela 3:



Fonte: ACS, 2022

Tabela 3 - Propriedades do Ácido Cítrico

| Propriedades do Ácido Cítrico | |
|--------------------------------------|--|
| Fórmula química | C ₆ H ₈ O ₇ |
| Massa molar | 192,12 g/mol |
| Densidade | 1,665 g/cm ³ |
| Ponto de fusão | 153 °C |
| Ponto de ebulição | Decompõe-se a 175 °C |
| Solubilidade em água | 1,33 kg/L (20 °C) |
| Aparência | Cristais ou pó incolor ou branco |

Fonte: ACS, 2022; FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014

Após sua descoberta, o ácido cítrico passou a ser produzido comercialmente pela primeira vez na Inglaterra por volta de 1826 a partir de limões italianos importados, uma vez que limões contêm 7-9% de ácido cítrico (MAX et al., 2010). Esse monopólio permaneceu até 1893 quando um outro alemão, o botânico Wehmer, constatou a viabilidade de se obter ácido cítrico através da fermentação de açúcares através do *Citromyces spp. (Penicillium glaucum)*, o que abriu espaço para novas vias de produção do ácido (SHOW et al., 2015; SOCCOL et al., 2006). E então, em 1916, o químico britânico, professor da Universidade de Liverpool, James Currie conduziu estudos acerca da produção de ácido cítrico e descobriu que algumas cepas de *Aspergillus niger* cresciam abundantemente em um meio nutriente com alta concentração de açúcar e sais minerais e um pH inicial de 2,5-3,5, o que reduzia a formação de outros ácidos e subprodutos (SHOW et al., 2015; PAPAGIANNI, 2007). Esses resultados revolucionaram a produção de ácido cítrico, permitindo o início da produção industrial em larga escala, estabelecida primeiramente pela farmacêutica Chas. Pfizer & Co. Inc. nos EUA em 1923 (MATTEY, 1992).

Existe também uma rota de síntese de ácido cítrico envolvendo reações puramente químicas, a qual foi descoberta em 1880 pelo físico e farmacêutico francês, Louis Grimaux, e seu aluno, Paul Adam, que usaram como reagente o glicerol, mas esse método não era economicamente competitivo o suficiente em comparação com as vias fermentativas (SHOW et al., 2015).

Surgiram, depois, outros métodos de produção, utilizando outros microrganismos, dentre fungos e leveduras, e os mais diversos substratos, mas o *Aspergillus niger* ainda representa a principal rota de obtenção, e inclusive, foram desenvolvidas cepas

específicas capazes de produzir em grande quantidade ácido cítrico em diferentes tipos de processos de fermentação (MAX et al., 2010).

Atualmente, depois de mais de 200 anos da descoberta do ácido cítrico, já se sabe muito a respeito desse composto, que além de ser encontrado em frutas cítricas, como se constatou em seus primórdios, na verdade está presente de forma abundante na natureza, pois resulta do metabolismo que ocorre naturalmente nos sistemas metabólicos e energéticos de quase todos os organismos vivos. Trata-se do ciclo de Krebs, também conhecido como ciclo do ácido cítrico, que envolve as etapas finais da conversão de carboidratos, gorduras ou proteínas em dióxido de carbono e água, com a liberação de energia necessária para o crescimento e sobrevivência dos seres, visto que também fornece os materiais carbonáceos a partir dos quais os aminoácidos e as gorduras são sintetizados pelas células (POERWONO et al., 2001).

Além de sua ocorrência natural, o ácido cítrico tornou-se fundamental sobretudo na indústria de alimentos e bebidas e na indústria farmacêutica e sua versatilidade deve-se ao fato de ser um composto não-tóxico e oficialmente reconhecido como seguro para o uso em alimentos pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) na categoria “GRAS”, acrônimo em inglês para *Generally Recognized as Safe* (SHOW et al., 2015). Seus usos dependem de três propriedades: acidez, sabor e formação de sais.

Em relação a sua acidez, ele possui três valores de constante de dissociação ácida (pK_a) em pH 3,1, 4,7 e 6,4. Como esses três valores estão relativamente próximos, o segundo H^+ é dissociado antes que o primeiro seja concluído, e o mesmo ocorre com o terceiro, o que confere a uma solução de ácido cítrico a característica de ser bem tamponada ao longo da curva de titulação, ou seja, é eficaz em manter o pH da solução relativamente constante numa extensa faixa de pH 2 até pH 7 (MATTEY, 1992).

Seu sabor deixa pouco retrogosto nos alimentos e ao mesmo tempo possui a capacidade de realçar outros sabores. Por conta disso, é muito utilizado como aromatizante em refrigerantes, vinhos, geleias e doces, sendo conhecido também como acidulante INS 330, dando um sabor ácido e refrescante na preparação de alimentos e de bebidas (POERWONO et al., 2001; PASTORE et al., 2011).

Já no que diz respeito à formação de sais, o ácido cítrico forma uma ampla gama de sais metálicos, incluindo complexos com cobre, ferro, manganês, magnésio e cálcio. Essa habilidade confere a ele propriedades de conservante, anticoagulante, antioxidante e o torna comumente utilizado como agente sequestrante em processos industriais (MATTEY, 1992).

O Quadro 1 a seguir reúne algumas das principais aplicações do ácido cítrico:

Quadro 1 - Aplicações do Ácido Cítrico

| Indústria | Aplicação | Finalidade |
|--------------|----------------------------------|---|
| Alimentos | Doces | Acidulante e previne a cristalização da sacarose |
| | Laticínios | Emulsificante e antioxidante |
| | Óleos e gorduras | Estabilizante |
| | Geleias | Conservante e ajusta o pH |
| Bebidas | Sucos | Estabilizante |
| | Refrigerantes | Flavorizante e acidulante |
| | Vinhos e sidras | Previne o escurecimento, inibe a oxidação e ajusta o pH |
| Farmacêutica | Remédios | Proporciona dissolução rápida de ingredientes ativos, anticoagulante, antioxidante e efeito efervescente |
| | Cosméticos e produtos de higiene | Agente quelante de íons metálicos e agente tamponante |
| Geral | Outros | Galvanoplastia, banhos de cobre, limpeza de metais, curtimento de couro, tintas de impressão, compostos de lavagem de garrafas, cimento para pisos, têxteis, reagentes fotográficos, concreto, gesso, adesivos, papel, polímeros, tabaco, tratamento de resíduos. |

Fonte: adaptado de SHOW et al., 2015; VANDENBERGHE et al., 1999

2.3.1 O Mercado do Ácido Cítrico

Em uma breve análise temporal, é possível perceber que o mercado de ácido cítrico vem crescendo significativamente nas últimas décadas. Em 1997, foram produzidas globalmente cerca de 736.000 toneladas (VANDENBERGHE et al., 1999), já em 2007 a produção quase que dobrou para mais de 1,4 milhão de toneladas (ANASTASSIADIS et al., 2008). Em 2013 foi registrada uma produção de 1,7 milhão de toneladas (ZHANG et al., 2014), e atualmente, já se estima mais de 2,5 milhões de toneladas por ano em todo o mundo (ACS, 2022; IMARC GROUP, 2023).

Destacam-se como principais produtores de ácido cítrico as seguintes empresas: as norte-americanas Archer Daniels Midland Company (ADM), atuante na indústria de alimentos e bebidas, e Cargill, renomada produtora de commodities agrícolas; a britânica Tate & Lyle, também do setor alimentício; Jungbunzlauer Suisse AG, da Suíça, especializada na produção de ingredientes biodegradáveis; Gadot Biochemical Industries, de Israel, atuando na indústria de ingredientes e aditivos bioquímicos; e a chinesa Cofco Biochemical (Anhui) Co, uma das maiores empresas de alimentos e

agronegócios da China (MORDOR INTELLIGENCE, 2023; SOCCOL et al., 2006; IMARC GROUP, 2023).

A China é um dos maiores produtores, exportadores e consumidores de aditivos alimentares do mundo e já foi a maior produtora de ácido cítrico, chegando a concentrar em torno de 40% da produção mundial, em 2004, segundo um relatório da Business Communications Co. (BCC) da época (MORDOR INTELLIGENCE, 2023; SOCCOL et al., 2006). Ainda na Ásia, a Índia vem ganhando relevância na produção de ácido cítrico e o Japão chama a atenção pela alta demanda por produtos saudáveis no país, o que faz com que os fabricantes incorporem o ácido cítrico de origem natural em alimentos para comercializar seus produtos como seguros e livres de conservantes (IMARC GROUP, 2023).

Entretanto, atualmente, a Europa Ocidental e os Estados Unidos lideram o mercado de ácido cítrico, sobretudo pela tendência em direção a produtos naturais e orgânicos e devido a um setor farmacêutico e cosmético altamente avançado e rigorosamente regulamentado, criando uma demanda por ingredientes confiáveis e de alta qualidade, em países como Alemanha, França e Reino Unido (IMARC GROUP, 2023).

No Brasil, a produção de ácido cítrico começou em 1954 a partir de fontes renováveis via rota biotecnológica e atingiu cerca de 3 mil toneladas por ano (MAX et al., 2010). No entanto, no início dos anos 2000, o país ainda dependia 100% da importação para suprir sua necessidade. Foi nesse momento que a Cargill inaugurou, no complexo industrial de Uberlândia (MG), uma fábrica de ácido cítrico com capacidade de 48 mil toneladas/ano, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima e visando tanto o mercado interno quanto atender a demanda do mercado consumidor latino-americano (DIÁRIO DO GRANDE ABC, 2000). Ainda existem duas plantas de ácido cítrico em operação em solo brasileiro, sendo uma delas a da Cargill, em Minas Gerais, que teve sua produção ampliada em 2015, e a outra em São Paulo da Tate & Lyle (ABIQUIM, 2018; BONATO 2015).

Em relação à capacidade produtiva de plantas de ácido cítrico, observa-se uma variação significativa nos valores encontrados na literatura que vão desde plantas menores com aproximadamente 36 toneladas por dia – como o caso das plantas da Vogelbusch Biocommodities, empresa austríaca de propriedade privada operadora global no setor de engenharia de plantas de biotecnologia (VOGELBUSCH, 2023) –, até grandes plantas com capacidade para produzir mais de 1.600 toneladas de ácido por dia (~600.000 ton/ano) – como as plantas da empresa chinesa Shandong Ensign Industry (CCM, 2023), que pretende aumentar a capacidade de suas plantas para até 700.000 ton/ano (~1.800 ton/dia). A Vogelbusch, em seu website, sinaliza que a capacidade mínima de uma planta para uma produção econômica de ácido cítrico deveria ser de pelo menos 20.000 toneladas por ano (~55 ton/dia) (VOGELBUSCH, 2023).

No Brasil, o último anuário da ABIQUIM que contém dados da produção das fábricas de ácido cítrico é o de 2006, no qual, a capacidade instalada das plantas da Cargill e da Tate & Lyle eram, respectivamente, 30.000 ton/ano (~82 ton/dia) e 33.660 ton/ano (~92 ton/dia) (ABIQUIM, 2006). A tabela 4 compila os dados encontrados de capacidade instalada para algumas plantas de ácido cítrico espalhadas pelo mundo:

Tabela 4 - Capacidade Instalada de plantas de ácido cítrico encontradas na literatura

| Capacidade Instalada (ton/dia) | Matéria-prima | Localização | Ano | Fonte |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------------|------------------|
| 36 | Açúcar bruto e melaço de beterraba | Irã | 2023 | VOGELBUSCH, 2023 |
| 36,5 | Açúcar bruto | Egito | 2023 | VOGELBUSCH, 2023 |
| ~ 1800 | Milho | China | 2023 | CCM, 2023 |
| ~ 1200 | Milho | China | 2023 | CCM, 2023 |
| ~ 2000 | Milho | China | previsto para 2027 | CCM, 2023 |
| ~ 600 | Milho | China | previsto para 2024 | CCM, 2022 |
| ~ 900 | Milho | China | - | CCM, 2023 |
| ~ 90 | Cana-de-açúcar | Brasil (SP) | 2006 | ABIQUIM, 2006 |
| ~ 100 | Cana-de-açúcar | Brasil (MG) | 2006 | ABIQUIM, 2006 |

Fonte: Elaboração própria a partir de VOGELBUSCH, 2023; CCM, 2023 e ABIQUIM, 2006

O Gráfico 4 mostra a divisão do mercado mundial de ácido cítrico por país, no qual se percebe que o Brasil não tem uma posição de destaque:

Gráfico 4 - Mercado de ácido cítrico: tamanho do mercado (%), por geografia, global, 2022



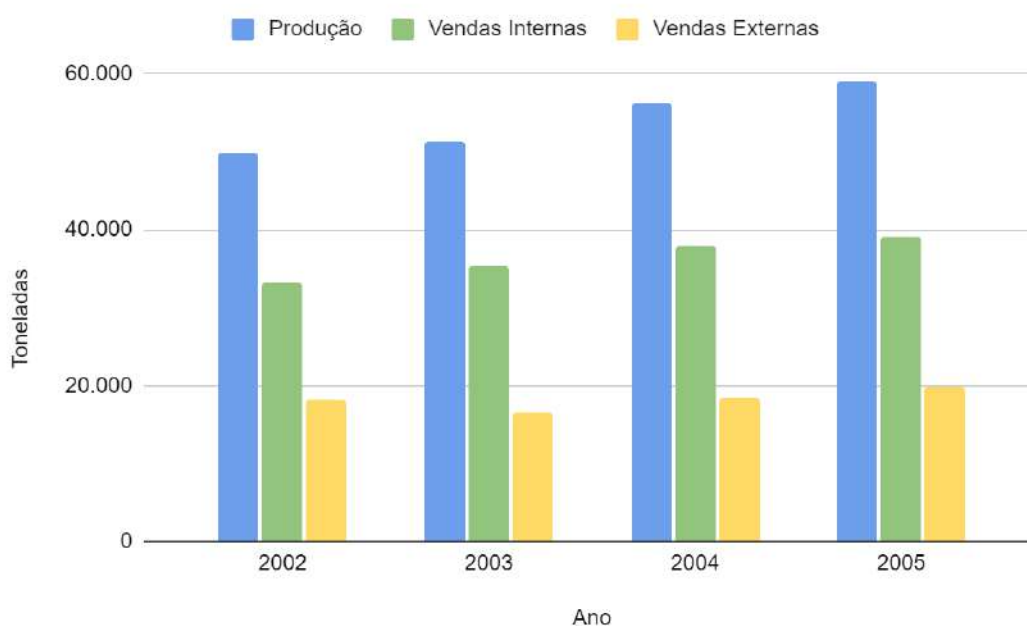
Fonte: MORDOR INTELLIGENCE, 2023

Atualmente, o ácido cítrico brasileiro é destinado principalmente aos países do Mercosul, sendo, aproximadamente, 34% para a Argentina, correspondendo a um valor comercial de 5 milhões de dólares, e 14% para o Uruguai, 2 milhões de dólares (OEC, 2021).

O mercado brasileiro de ácido cítrico é pautado, sobretudo, pelo mercado de acidulantes para a indústria de alimentos e bebidas, o qual está em crescimento constante, com previsão de taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,5% de 2020 a 2025 no país (MORDOR INTELLIGENCE, 2023). Esse crescimento é impulsionado pela ampla aplicação de acidulantes na indústria de alimentos e bebidas, e o ácido cítrico se destaca como o protagonista devido à sua acessibilidade e compatibilidade com diversos produtos finais. A demanda por alimentos processados, especialmente alimentos ultraprocessados, tem impulsionado esse mercado, e os fabricantes locais diversificam suas ofertas de ácido cítrico para atender à crescente demanda. O mercado é fragmentado, com participantes regionais e globais, e oferece oportunidades contínuas à medida que a indústria de alimentos e bebidas prospera no Brasil (MORDOR INTELLIGENCE, 2023).

O Gráfico 5 a seguir reúne os dados disponíveis no anuário de 2010 da ABIQUIM acerca da produção e vendas declaradas de ácido cítrico no Brasil:

Gráfico 5 - Produção e Vendas declaradas (ton/ano)



Fonte: ABIQUIM, 2010

É interessante observar que o percentual das vendas internas corresponde, em média, a 67% do valor total produzido no período observado.

A Tabela 5 reúne dados de importação e exportação de ácido cítrico obtidos a partir do Comex Stat (Ministério da Economia, 2023), enquanto o Gráfico 6 exibe a evolução histórica do preço médio:

Tabela 5 - Importação e exportação de ácido cítrico no Brasil

| Ano | Importação | | | Exportação | | |
|------|------------------|--------------------|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| | Valor FOB (US\$) | Quilograma Líquido | Preço médio por kg (US\$) | Valor FOB (US\$) | Quilograma Líquido | Preço médio por kg (US\$) |
| 2023 | 31.690.894 | 21.761.587 | 1,46 | 14.489.326 | 6.473.447 | 2,24 |
| 2022 | 54.448.562 | 23.418.622 | 2,33 | 18.784.541 | 10.063.412 | 1,87 |
| 2021 | 18.121.061 | 15.199.437 | 1,19 | 14.318.688 | 10.032.340 | 1,43 |
| 2020 | 12.819.338 | 12.637.889 | 1,01 | 9.767.248 | 7.036.352 | 1,39 |
| 2019 | 21.857.420 | 21.031.879 | 1,04 | 10.273.178 | 7.167.413 | 1,43 |
| 2018 | 15.903.855 | 14.022.554 | 1,13 | 14.154.067 | 9.127.433 | 1,55 |
| 2017 | 20.629.964 | 17.133.648 | 1,20 | 7.711.750 | 4.640.626 | 1,66 |
| 2016 | 27.625.542 | 23.864.536 | 1,16 | 8.362.142 | 5.136.444 | 1,63 |
| 2015 | 18.042.111 | 14.637.978 | 1,23 | 13.947.971 | 8.062.615 | 1,73 |
| 2014 | 25.864.203 | 18.876.995 | 1,37 | 25.621.661 | 13.722.289 | 1,87 |
| 2013 | 32.101.757 | 21.900.721 | 1,47 | 24.641.046 | 13.059.408 | 1,89 |
| 2012 | 14.833.323 | 12.007.827 | 1,24 | 35.911.746 | 18.366.977 | 1,96 |
| 2011 | 36.005.829 | 30.744.423 | 1,17 | 47.254.086 | 25.637.891 | 1,84 |
| 2010 | 23.268.621 | 25.086.247 | 0,93 | 51.411.517 | 32.595.151 | 1,58 |
| 2009 | 13.460.032 | 14.347.037 | 0,94 | 46.119.254 | 29.875.444 | 1,54 |
| 2008 | 11.527.144 | 8.897.386 | 1,30 | 31.476.285 | 28.547.345 | 1,10 |
| 2007 | 4.714.027 | 5.930.860 | 0,79 | 21.302.104 | 22.824.220 | 0,93 |
| 2006 | 5.893.752 | 7.789.710 | 0,76 | 18.078.689 | 19.873.306 | 0,91 |
| 2005 | 4.954.365 | 5.971.347 | 0,83 | 18.607.344 | 19.875.007 | 0,94 |
| 2004 | 413.048 | 633.741 | 0,65 | 16.866.500 | 18.534.068 | 0,91 |
| 2003 | 372.323 | 451.515 | 0,82 | 13.412.618 | 16.648.964 | 0,81 |
| 2002 | 374.354 | 468.742 | 0,80 | 15.403.379 | 18.240.751 | 0,84 |
| 2001 | 2.042.833 | 4.615.545 | 0,44 | 13.501.979 | 13.611.988 | 0,99 |
| 2000 | 4.480.972 | 4.241.898 | 1,06 | 10.425.557 | 8.802.690 | 1,18 |
| 1999 | 4.464.273 | 3.868.942 | 1,15 | 14.187.977 | 12.139.756 | 1,17 |
| 1998 | 6.905.244 | 6.026.509 | 1,15 | 6.474.781 | 4.403.462 | 1,47 |
| 1997 | 6.171.229 | 4.918.200 | 1,25 | 8.813.577 | 5.638.847 | 1,56 |

Fonte: COMEX STAT, 2023, consultado em 10 out. 2023

Gráfico 6 - Preço médio de importação e exportação por kg de ácido cítrico no Brasil



Fonte: COMEX STAT, 2023

Ao analisar os dados de importação e exportação de ácido cítrico no Brasil ao longo dos anos, observa-se uma tendência geral de aumento nas quantidades importadas e exportadas. Anteriormente, as exportações de ácido cítrico superavam as importações, indicando uma posição de destaque do Brasil no mercado internacional deste produto. A produção interna significativa permitia ao Brasil atender à demanda nacional e, ao mesmo tempo, exportar quantidades consideráveis para outros países.

No entanto, ao longo do tempo, a dinâmica desse mercado mudou. A China se estabeleceu como um gigante na produção de ácido cítrico, apresentando uma combinação de grande escala, eficiência produtiva e preços competitivos (MORDOR INTELLIGENCE, 2023). Esses fatores contribuíram para a competitividade do ácido cítrico chinês no mercado internacional. Em paralelo, os dados sugerem que houve o aumento na demanda interna brasileira, possivelmente impulsionado pelo crescimento dos principais setores consumidores desse produto como o de alimentos e bebidas e o farmacêutico, o que pode ter contribuído para a inversão deste cenário, e diante disso, o Brasil precisou aumentar as importações. Dessa forma, sobretudo nos últimos anos, as importações superaram as exportações, sugerindo uma demanda interna expressiva fortemente dependente de fontes internacionais para suprir essa necessidade, resultando em um déficit comercial para o produto.

Essa dependência histórica de importações destaca a importância de considerar estratégias para fortalecer a produção interna, reduzindo a vulnerabilidade do mercado nacional a oscilações externas. Diante da balança comercial negativa, a implementação de mais uma planta de ácido cítrico no Brasil se mostra uma alternativa promissora. Isso não apenas atenderia à crescente demanda interna, mas

também poderia contribuir para o desafio de equilibrar a balança comercial, impulsionando a economia local e fortalecendo a autossuficiência do país na produção desse importante insumo industrial.

As faixas de preço para o ácido cítrico tendem a variar bastante conforme as oscilações do mercado e o valor médio internacional que já foi de US\$2,0/kg no início dos anos 2000 (SOCCOL et al., 2006; ANASTASSIADIS et al., 2008), abaixou, posteriormente para a faixa de US\$1,0-1,3/kg (DHILLON et al., 2011), caindo ainda mais para a faixa de US\$0,70-0,80/kg (SOCCOL et al., 2006; ANASTASSIADIS et al., 2008). Recentemente, em 2019, o preço médio desse produto no mundo encontrava-se em torno de US\$0,60/kg (PACHECO et al., 2019).

Entretanto, com a pandemia de COVID-19 agravada em 2020, vários setores enfrentaram desafios, incluindo cadeias de suprimentos interrompidas, aumento dos custos de produção e uma demanda flutuante. Esses fatores contribuíram para aumentos de preços em diversos produtos, e o ácido cítrico não foi exceção. Isso é refletido ao analisar os dados acima sobre o cenário brasileiro, que revelam que nesses anos o preço médio do produto no país estava próximo de US\$2,00/kg. Por outro lado, em 2023 o preço já voltou a baixar.

Além disso, nos anos de 2020 e 2021 observou-se uma baixa tanto em relação à importação quanto à exportação. Uma possível explicação para isso é o fato que a indústria de alimentos e bebidas, uma grande consumidora de ácido cítrico, foi impactada por interrupções na produção e distribuição, o aumento nos custos logísticos e matérias-primas, contribuíram para uma escassez de oferta e consequentemente pressionaram os preços para cima. Esses desafios, juntamente com as dinâmicas do mercado global durante a pandemia, influenciaram significativamente a indústria, refletindo-se em mudanças na demanda e nos padrões de compra do ácido cítrico.

Mesmo diante dessa situação, o Brasil continua movimentando o mercado de ácido cítrico devido a importância desse insumo. Dentre os principais países que compram o ácido cítrico brasileiro estão os vizinhos latino-americanos, sendo, em 2021, 34% para a Argentina, 14% para o Uruguai e 4% para o Chile, enquanto os Estados Unidos importam 16% (OEC, 2023). Já o principal exportador desse produto para o Brasil é a China, correspondendo a 52% das importações brasileiras (OEC, 2023).

Mundialmente, o mercado desse produto químico está atualmente dividido em 70% para a indústria de alimentos, 12% para a indústria farmacêutica e de cosméticos e 18% para outros setores (DHILLON et al., 2011; SOCCOL et al., 2006; BEHERA, MISHRA & MOHAPATRA, 2021). Entretanto, estudos preveem a diversificação desse mercado devido a novas aplicações e tendências que estão surgindo. Dentre elas está o potencial do ácido cítrico para a produção de biopolímeros; detergentes e desinfetantes contra uma série de vírus; engenharia de tecidos para o cultivo de

células; substituto sustentável para ácidos minerais tóxicos na recuperação de pectina; aplicação eficiente em processos de remediação ambiental; crescente uso para fabricação de medicamentos especializados e mastigáveis; e a possibilidade de ser produzido de forma ambientalmente sustentável a partir de fontes naturais (NAEINI, 2010; GUILLERMO, 2010; CIRIMINNA et al., 2017).

Como resultado, espera-se que o mercado de ácido cítrico cresça consideravelmente nos próximos anos, de 3,48 bilhões de dólares em 2023 para 4,27 bilhões de dólares até 2028, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,16% (MORDOR INTELLIGENCE, 2023). Portanto, pode-se considerar factível que haja uma necessidade de encontrar maneiras de aumentar o volume de sua produção (DHILLON et al., 2011), sobretudo sob o contexto da bioeconomia e economia circular.

2.3.2 Rotas de Produção do Ácido Cítrico

Existem três principais rotas conhecidas para a obtenção do ácido cítrico: os processos extrativos tradicionais conhecidos desde o século XVIII; rotas bioquímicas envolvendo diversos processos de fermentação, substratos e microrganismos; e as sínteses químicas (MAX et al., 2010).

O método tradicional de preparação do ácido cítrico a partir do suco de certas frutas cítricas tornou-se obsoleto com o desenvolvimento da tecnologia de fermentação e síntese química (POERWONO et al., 2001). Embora na América do Sul, México e Grécia ainda existam algumas fábricas onde o ácido cítrico é isolado de frutas cítricas, hoje mais de 99% da produção mundial de ácido cítrico é obtida de forma microbiológica (BEROVIC & LEGISA, 2007; LEONEL & CEREDA, 1995).

Por fim, desde 1880, quando Grimoux e Adam descobriram uma rota sintética, baseada na reação de dicloroacetona derivada de glicerol com cianeto, diversas sínteses químicas do ácido cítrico têm surgido na literatura química e de patentes. No entanto, nenhuma dessas sínteses conseguiu alcançar um status comercial competitivo em comparação com os processos de fermentação (BEROVIC & LEGISA, 2007; POERWONO et al., 2001).

2.3.2.1 Rota bioquímica para a produção de Ácido Cítrico

O ácido cítrico se acumula em cultivos microbianos quando nutrientes, como açúcar e oxigênio, estão em alta concentração; quando as condições do meio, como pH (próximo de 1,8 a 2,0), aeração e temperatura, são favoráveis; e, ainda, quando íons metálicos, nitrogênio, fosfato estão presentes na concentração certa, sem excessos ou carência (PASTORE et al., 2011; FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014). Contudo, os principais determinantes da viabilidade de um processo de produção de ácido cítrico incluem o próprio agente fermentativo e o tipo de fermentação adotados.

Em relação aos microrganismos que podem ser escolhidos para a produção existe um amplo espectro, abrangendo tanto fungos quanto bactérias, como *Arthrobacter paraffinens*, *Bacillus licheniformis*, *Corynebacterium spp.*, *Aspergillus niger*, *A. aculeatus*, *A. carbonarius*, *A. awamori*, *A. foetidus*, *A. fonsecaeus*, *A. phoenicis* e *Penicillium janthinellum*, bem como leveduras como *Candida tropicalis*, *C. oleophila*, *C. guilliermondii*, *C. citroformans*, *Hansenula anamola* e *Yarrowia lipolytica* (BEROVIC & LEGISA, 2007; SHOW et al., 2015)

No entanto, a maioria desses microrganismos não é capaz de gerar rendimentos comercialmente viáveis, uma vez que o ácido cítrico é um subproduto do metabolismo energético e sua acumulação ocorre em quantidades substanciais apenas em situações de desequilíbrio considerável (SOCCOL et al., 2006). Sendo assim, mutantes de *Aspergillus* e leveduras do gênero *Candida* têm sido quase que exclusivamente empregados (BEROVIC & LEGISA, 2007), e entre eles, o fungo filamentosso *Aspergillus niger* sobressai como a escolha preferida na produção comercial, devido à sua capacidade de produzir uma maior quantidade de ácido cítrico por unidade de tempo, facilidade de manipulação, sua habilidade em fermentar uma variedade de matérias-primas de baixo custo e a obtenção de elevados rendimentos. Apesar disso, cepas industriais que produzem ácido cítrico em escala comercial não estão amplamente disponíveis e apenas algumas delas podem ser adquiridas em coleções internacionais de culturas (SOCCOL et al., 2006).

A técnica de fermentação também afeta o rendimento do ácido cítrico. As três principais técnicas empregadas atualmente são: fermentação em estado sólido, também conhecido como Koji; fermentação em superfície, na qual o micélio do fungo cresce sobre a superfície do meio de cultura estático, e o produto é recolhido do meio; e fermentação submersa, na qual o fungo se desenvolve inteiramente submerso no meio de cultura líquido sob agitação, que assegura a homogeneidade tanto da distribuição dos microrganismos quanto dos nutrientes (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014).

Portanto, uma cepa pode apresentar um bom rendimento no processo de fermentação submersa, mas um rendimento baixo no processo de fermentação no estado sólido (SHOW et al., 2015). Sendo assim, cada cepa precisa ser testada em cada um dos métodos de fermentação, bem como nos substratos industriais, para determinar o melhor método de fermentação (CHEN et al., 2014). A seguir serão apresentadas as três principais vias fermentativas.

2.3.2.1.1 Fermentação em superfície

O processo de fermentação em superfície é capaz de fornecer ácido cítrico a baixo custo (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014). Nesse processo, o microrganismo é cultivado disperso em um meio líquido em bandejas rasas de alumínio ou aço inoxidável contendo solução de açúcar, juntamente com fontes de nitrogênio

acessível, fosfato, magnésio e vários minerais traços. O crescimento do mofo ocorre na superfície da solução, formando uma massa micelial, durante 8 a 10 dias e a concentração de açúcar diminui de 20-25% para 1-3% durante a fermentação. (POERWONO et al., 2001). Quando termina, o mosto pode ser drenado e substituído, mas isso exige cuidados para manter o micélio flutuando na superfície. Para evitar interferência de íons metálicos, eles são removidos ou reduzidos por adsorção antes do início da fermentação. (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014).

2.3.2.1.2 Fermentação submersa

As primeiras fermentações industriais de ácido cítrico eram realizadas como culturas de superfície, até que em 1938, os estudos de Perquin, cuja relevância pode ser comparada ao trabalho de Currie no processo de superfície, devido à sua habilidade e precisão, introduziram a fermentação submersa, representando uma melhoria significativa e tornando viável sua implementação comercial (BEROVIC & LEGISA, 2007). Hoje em dia, essa técnica é amplamente empregada na produção de ácido cítrico, representando cerca de 80% da produção mundial (SOCCOL et al., 2006).

É um processo utilizado em grande escala que demanda instalações sofisticadas e controle rigoroso, mas oferece vantagens como maior produtividade, rendimento, redução de custos de mão de obra e risco de contaminação (BEHERA, MISHRA & MOHAPATRA, 2021), uma vez que este método proporciona uma transferência de massa eficiente na solução líquida, a capacidade de processamento contínuo e de aproveitar os microrganismos em crescimento exponencial e a facilidade de escalabilidade dos fermentadores com menor intervenção manual.

O recipiente de fermentação geralmente consiste em um tanque esterilizável equipado com um agitador mecânico e um meio de introdução de ar estéril (POERWONO et al., 2001). Dois tipos de fermentadores são empregados, fermentadores agitados convencionais e fermentadores em torre, embora os últimos sejam preferidos devido às vantagens que oferecem em preço, tamanho e operação (ROHR et al., 1983). A fermentação submersa pode ser conduzida em batelada, batelada alimentada ou de forma contínua, geralmente concluindo-se em 5 a 12 dias, dependendo das condições do processo (VANDENBERGHE et al., 1999; SOCCOL et al., 2006).

2.3.2.1.3 Fermentação em estado sólido

A fermentação no estado sólido, também conhecida como processo "Koji", foi desenvolvida no Japão, aproveitando matérias-primas abundantes, como resíduos de frutas e farelo de arroz, e desde então tem sido uma alternativa para aproveitar resíduos agroindustriais (VANDENBERGHE et al., 1999).

Nesse processo, a fase sólida atua como fonte de carbono e nitrogênio, além de servir como suporte para o crescimento dos microrganismos em um ambiente com baixa

atividade de água em um material insolúvel que serve como suporte e fonte de nutrientes (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014). O substrato é umedecido até atingir cerca de 70% de umidade, com ajuste de pH para 4,5-6,0, e incubação a 28-30 dias (SOCCOL et al., 2006). Sendo assim, o crescimento microbiano ocorre em condições mais próximas às dos habitats naturais.

A presença de elementos traços, aqueles que ocorrem em níveis de parte por milhão, ou seja, em teores muito pequenos, tem menos impacto na produção de ácido cítrico em comparação com a fermentação submersa, eliminando a necessidade de pré-tratamento do substrato. Diversos tipos de fermentadores têm sido utilizados na fermentação de ácido cítrico em estado sólido (BEHERA, MISHRA & MOHAPATRA, 2021).

A fermentação em estado sólido é uma alternativa interessante uma vez que os metabólitos obtidos são mais concentrados e o processo de purificação é menos oneroso (KOTWAL et al., 1998).

2.3.3 Matérias-Primas

Diversos substratos podem ser utilizados na fermentação para produção de ácido cítrico, incluindo melão de beterraba, melão de cana, glicerol, amido de milho, casca de kiwi, casca de abacaxi, bagaço de maçã, casca de café, bagaço de uva, farelo de arroz, dentre diversos outros (SHOW et al., 2015; BEHERA, MISHRA & MOHAPATRA, 2021).

O melão, subproduto da indústria açucareira, é frequentemente escolhido devido ao seu custo relativamente baixo e alto teor de açúcar (40–55 %) (SOCCOL et al., 2006). No entanto, a qualidade do melão varia, exigindo pré-tratamento para torná-lo adequado à fermentação. Estudos indicam que o melão de beterraba tende a resultar em maiores rendimentos em comparação com o melão de cana, devido à presença de metais traços que afetam negativamente a síntese de ácido cítrico (SHOW et al., 2015).

Além disso, substratos inovadores, como resíduos agrícolas, têm sido explorados para a produção de ácido cítrico (SHOW et al., 2015). A crescente atenção voltada para a bioconversão de resíduos agrícolas e da indústria de alimentos se deve ao fato de que esses materiais podem ser transformados em recursos valiosos. Nesse sentido, a fermentação em estado sólido desempenha um papel fundamental, permitindo a síntese de diversos compostos de alto valor agregado, com aplicações industriais significativas (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014).

Resíduos agroindustriais, como bagaço de mandioca, a casca de café, o farelo de trigo, o resíduo de abacaxi, o bagaço de uva, resíduos cítricos, entre outros, são especialmente adequados para a fermentação em estado sólido. Sua composição,

rica em celulose, hemicelulose, lignina, amido, pectina e proteínas, os torna fontes ideais de carbono e suporte para o crescimento microbiano.

No Brasil, onde a produção agrícola gera grandes quantidades desses resíduos, a fermentação em estado sólido emerge como uma tecnologia promissora para gerenciar esses materiais, reduzindo potenciais impactos ambientais e agregando valor por meio da produção de substâncias de interesse econômico. Isso pode contribuir para a diversificação do agronegócio nacional, gerando enzimas, hormônios, ácidos orgânicos, aromas, pigmentos e agentes de controle biológico de pragas, entre outros produtos de grande relevância econômica (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2014).

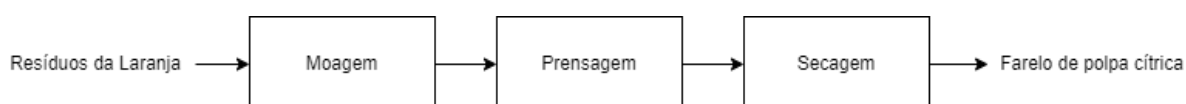
2.4 Produção de Ácido Cítrico a partir dos resíduos do processamento da laranja

Dado que o ácido cítrico é um dos produtos de fermentação mais amplamente produzidos globalmente, há um forte estímulo para buscar soluções que aprimorem sua produção. Entretanto, um desafio na produção de ácido cítrico por meio de fermentação é o custo elevado do processo, em grande parte devido ao substrato. Para viabilizar qualquer processo produtivo industrial, é crucial empregar matérias-primas de baixo custo, visando a redução dos custos de produção, sem comprometer a qualidade do produto final.

Nesse sentido, a utilização de resíduos industriais como parte do meio de cultivo para microrganismos em sistemas de fermentação em estado sólido é economicamente relevante, oferecendo uma alternativa biotecnológica para a valorização de resíduos sólidos agrícolas e agroindustriais (LEONEL & CEREDA, 1995; RODRIGUES, 2006). O baixo custo, o alto teor de carboidratos e a suscetibilidade à fermentação tornam os subprodutos cítricos matérias-primas atrativas para a produção biotecnológica de ácido cítrico (TORRADO et al., 2011).

Os resíduos provenientes das laranjas descartadas e/ou processadas no processo de produção de suco, podem ser reaproveitados para esse intuito, visto que aproximadamente 50% da fruta in natura se converte em resíduo após a extração do suco (REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012). Esse material residual é predominantemente composto pelas cascas da fruta e pode ser transformado no farelo de polpa cítrica (SUZUKI, 2019) pela sequência de processos ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Processo de produção do farelo de polpa cítrica.



Fonte: adaptado de SUZUKI, 2019.

A seguir, serão detalhados os processos industriais para a obtenção do ácido cítrico a partir dos resíduos do processamento da laranja, utilizando como referência três estudos específicos. O primeiro, conduzido por Torrado et al. (2011), explorou a produção de ácido cítrico a partir de resíduos de casca de laranja por meio de fermentação em estado sólido. O segundo estudo, realizado por Rodrigues (2006) como parte do Programa de Pós-Graduação em Processos Biotecnológicos da Universidade Federal do Paraná (UFPR), focou no desenvolvimento de um bioprocesso para a produção de ácido cítrico também por fermentação no estado sólido, utilizando polpa cítrica como substrato. O terceiro estudo, também da Universidade Federal do Paraná (UFPR), elaborado por Camargo (2002), abordou o desenvolvimento de um bioprocesso em escala semipiloto para a produção de ácido cítrico por fermentação no estado sólido a partir do bagaço de mandioca, do qual o processo de preparo do inóculo foi utilizado como referência. Os processos aqui descritos serão a base para todo o estudo de pré-viabilidade econômica a ser desenvolvido ao longo deste trabalho.

A matéria-prima a ser utilizada constitui-se majoritariamente pelas cascas da laranja oriundas do processamento das frutas para produção de suco, entretanto, a realidade é que nesse resíduo industrial não se encontram apenas as cascas e sim uma mistura de bagaço, laranjas descartadas, sementes e cascas. Dessa forma, a primeira etapa consiste no tratamento e preparo desse resíduo para que se obtenha um substrato ideal para a fermentação. Esse tratamento nada mais é do que o preparo do farelo de polpa cítrica já ilustrado anteriormente na Figura 3.

As frutas descartadas, cascas e demais resíduos da laranja são moídas para uma granulometria inferior a 2 mm por meio de moinhos de martelo. Para combater a elevada umidade (cerca de 80%), a mistura é prensada, reduzindo o teor de umidade para 35%, o que corresponde a uma perda percentual de peso de aproximadamente 45%. Esse processo tem como subproduto uma água residual, que pode ser tratada para reuso ou irrigação na própria instalação ou então ser encaminhada para estações de tratamento. Em seguida, os sólidos passam por um processo de secagem com ar até atingir aproximadamente 10% de umidade (SUZUKI, 2019). Esse processo representa uma parte significativa dos custos totais de operação da indústria e a etapa que mais demanda energia é a secagem (PFALTZGRAFF, 2014; NEGRO et al., 2017).

O microrganismo *Aspergillus niger* é utilizado como agente fermentador. Para isso, é necessária a etapa de preparo do inóculo, que se refere à fase do processo biotecnológico em que uma quantidade controlada de microrganismos, geralmente na forma de esporos, células ou culturas puras, é preparada e introduzida no meio de cultura para iniciar a fermentação ou outro processo biológico desejado. Nesse caso, a produção de esporos ocorre em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 50 mL de meio Ágar Batata Dextrose (PDA), previamente esterilizado a 121 °C por 15 minutos.

Após o resfriamento (45-55 °C), o inóculo é preparado a partir das culturas de PDA por um período de incubação a 33 °C por 5 dias (RODRIGUES, 2006).

O substrato é preparado sem adição de nutrientes, apenas com o farelo de polpa cítrica e adição de água até obter uma umidade inicial de 70% (aproximadamente 2,52 mL/g de resíduo de laranja seco) e um pH inicial de 5,5. A esterilização é feita por autoclavagem, seguida pela adição do inóculo. Os frascos são incubados a 30 °C, agitados diariamente e amostrados para análises subsequentes, incluindo a determinação do teor de umidade e extratos aquosos.

A fermentação é conduzida em bandejas perfuradas de modo que a espessura do substrato seja de 4 cm. A inoculação ocorre em bandejas plásticas separadas, com homogeneização do meio antes de ser distribuído sobre as bandejas perfuradas para minimizar a compactação e com uma suspensão de esporos para atingir uma concentração de 10^7 esporos/g de casca de laranja/polpa cítrica seca. O processo fermentativo se dá ao longo de 4 dias, mantendo a temperatura a 30°C e umidade da sala acima de 90%.

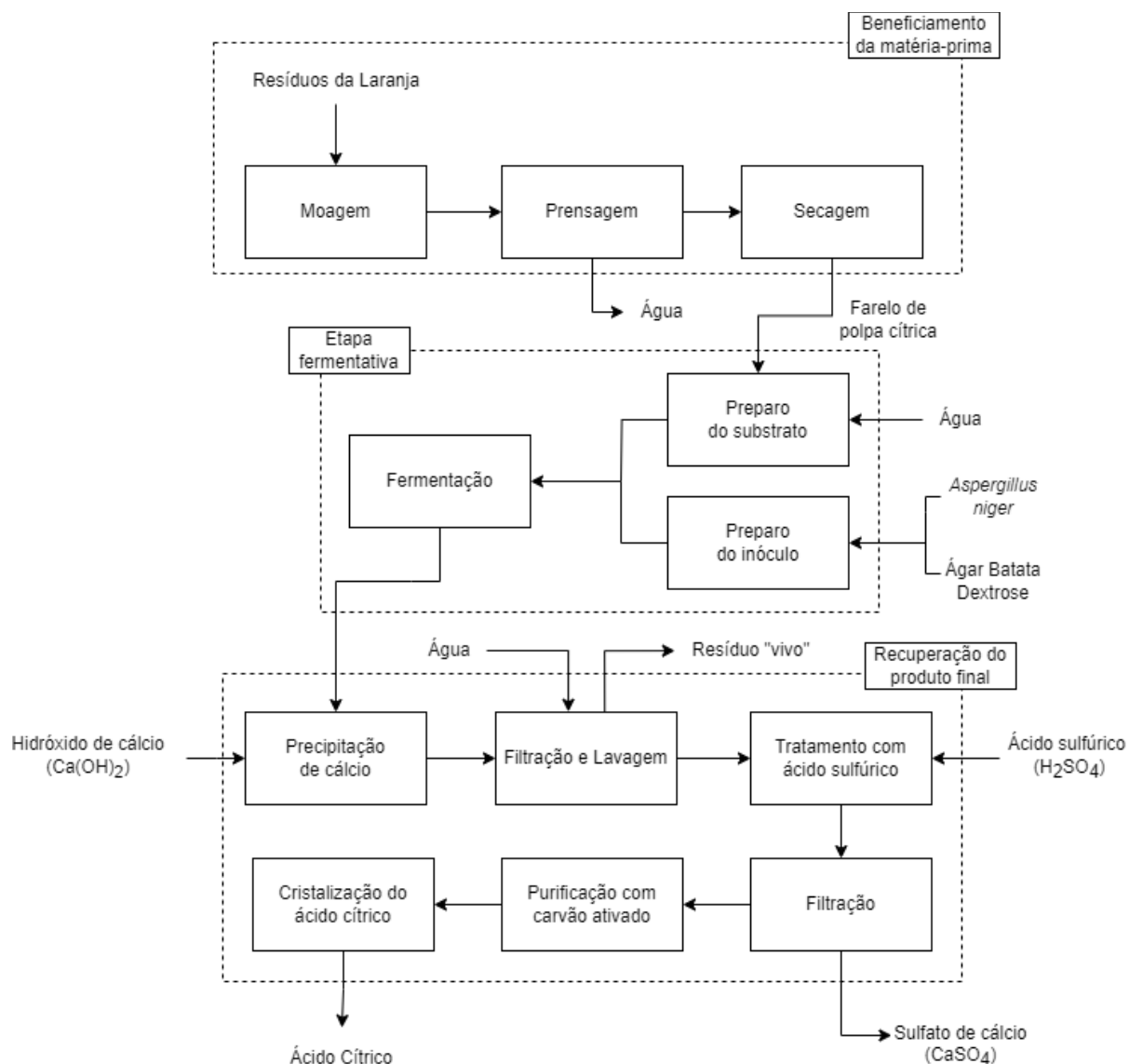
Ao final da fermentação, para a recuperação do ácido cítrico emprega-se o método da precipitação, visto que é o método de recuperação mais utilizado industrialmente (SILVA et al., 2018). Nesse processo não há necessidade de se remover o material em suspensão por filtração. É realizado primeiramente uma neutralização, onde ocorre a precipitação de citrato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) pela adição de uma suspensão de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ao meio. O precipitado é removido por filtração e lavado várias vezes com pouca quantidade de água para que sejam removidos sacarídeos, cloretos e outras impurezas (SILVA et al., 2018; SINGH DHILLON et al, 2011). O citrato é então tratado com ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) para converter o citrato de cálcio em sulfato de cálcio (CaSO_4) e ácido cítrico (PATEL & PANDYA, 2017; PAZOUKI & PANDA, 1998). A solução é novamente filtrada para remover o CaSO_4 , deixando o filtrado marrom chamado ácido bruto. Essa solução-mãe contendo ácido cítrico é tratada com carvão ativado para remover impurezas residuais (WANG et al., 2020). Por fim, a solução é concentrada em cristalizadores a vácuo a 20-25°C, formando ácido cítrico monoidratado. Dependendo da pureza, os cristais brutos são subsequentemente submetidos a uma ou mais etapas de recristalização com purificação por carvão ativado antes de se obter o ácido cítrico quimicamente puro (PATEL & PANDYA, 2017).

Durante o processo de recuperação são gerados três tipos de resíduos: a água residual proveniente das filtrações realizadas; o resíduo “vivo” que contém microrganismos, proteínas, aminoácidos, açúcar, etc., e o outro é sulfato de cálcio. Todos os três devem enviados para serem tratados antes da sua disposição final, o que representa custos. Após, a água pode ser reaproveitada para irrigação ou demais utilidades na unidade; o segundo resíduo pode ser seco e usado como ração para animais; e o terceiro, depois de passar por tratamento adequado, pode ser fornecido como matéria-prima para fábricas de cimento ou para agricultura – onde é utilizado

para melhorar a qualidade do solo ou como fertilizante –, uma vez que é facilmente transformado em gesso mediante a hidratação (PATEL & PANDYA, 2017; BRASIL, LIMA, CRAVO, 2018; NIKULICHEVA, et al, 2021; GODOY et al., 2018).

O diagrama de blocos do processo é apresentado na Figura 4:

Figura 4 - Diagrama de blocos do processo de obtenção do ácido cítrico.



Fonte: elaboração própria

Abaixo estão listados os principais equipamentos que são necessários no processo ilustrado acima:

- Beneficiamento da matéria-prima:
 - Moagem: moinho de martelos
 - Prensagem: prensa hidráulica
 - Secagem: secador de bandeja

- Etapa fermentativa:
 - Preparo do substrato: tanque de mistura
 - Preparo do inóculo: tanque de mistura
 - Fermentação: fermentador de bandeja

- Recuperação do produto final
 - Precipitação de cálcio: reator
 - Filtração e lavagem: filtro a vácuo
 - Tratamento com ácido sulfúrico: reator
 - Filtração: filtro a vácuo
 - Purificação com carvão ativado: coluna de carvão ativado
 - Cristalização do ácido cítrico: cristalizador e secador rotativo

3 METODOLOGIA

Após a identificação da oportunidade de utilizar os resíduos da produção de suco de laranja para a produção de ácido cítrico, faz-se necessária a etapa de estudo de pré-viabilidade a fim de indicar se há ou não atratividade econômica no projeto. As plantas químicas são construídas para gerar lucro, dessa forma, a estimativa do investimento necessário e do custo de produção é necessária antes que a rentabilidade de um projeto possa ser avaliada.

Para isso, será utilizado um modelo de avaliação econômica que se fundamenta nos seguintes componentes: estimativa de investimento, estimativa dos custos de produção, elaboração das demonstrações contábeis (Demonstração do Resultado do Exercício - DRE e Demonstração do Fluxo de Caixa - DFC), estimativa de receitas, cálculo dos indicadores econômicos de viabilidade e análise de sensibilidade. O propósito desta seção é apresentar a metodologia empregada na determinação de cada uma das etapas citadas acima.

A fronteira do sistema para a análise econômica é definida desde o transporte da matéria-prima (resíduos da laranja) à planta até a produção do produto final (ácido cítrico). O tempo de operação da planta de ácido cítrico é considerado como 330 dias por ano, com uma vida útil econômica de 20 anos. A capacidade instalada da planta é de 100 ton/dia (capacidade equivalente às plantas que existem no Brasil), o que resulta em uma taxa de produção de aproximadamente 4166 kg/h de ácido cítrico. Para o processo descrito esperam-se rendimentos de 410 g de ácido cítrico por kg de resíduo de laranja seco (RODRIGUES, 2006). O balanço de massa do processo, necessário para o estudo de pré-viabilidade econômica, é descrito a seguir na Tabela 6:

Tabela 6 - Balanço de massa do processo

| Parâmetro | Valor | Unidade de medida | Fonte |
|---|----------------|-------------------|-------------------------------------|
| Capacidade instalada da planta de ácido cítrico | 33.000,00 | ton/ano | |
| Capacidade instalada da planta de ácido cítrico | 100,00 | ton/dia | |
| Capacidade instalada da planta de ácido cítrico | 4.166,67 | kg/h | |
| Rendimento do processo | 41% | | RODRIGUES, 2006 |
| Quantidade necessária de resíduo seco | 243,90 | ton/dia | |
| % de perda de peso na secagem | 45% | | SUZUKI, 2019 |
| Quantidade necessária de resíduo | 542,01 | ton/dia | |
| % da laranja correspondente a resíduo | 50% | | REZZADORI, BENEDETTI e AMANTE, 2012 |
| Quantidade necessária de laranja a ser processada | 1.084,01 | ton/dia | |
| Quantidade de suco produzido por laranja | 40% | | SUPERCITRUS, 2021 |
| Quantidade necessária de suco produzido | 433,60 | ton/dia | |
| Massa específica média do suco de laranja | 1.050,09 | g/L | FERREIRA et al., 2019 |
| Capacidade necessária de uma planta de suco para atender a demanda de resíduo | 412.923,08 | L/dia | |
| Capacidade necessária de uma planta de suco para atender a demanda de resíduo | 136.264.617,53 | L/ano | |
| Capacidade necessária de uma planta de suco para atender a demanda de resíduo | 143.089,43 | ton/ano | |

Fonte: elaboração própria

Como já citado anteriormente, os volumes expressivos de importação de ácido cítrico no Brasil nos últimos anos destacam a considerável demanda interna, como evidenciado pelos dados do Comex Stat – 21,76 mil toneladas em 2023, 23,42 mil toneladas em 2022 e 15,20 mil toneladas em 2021. Diante desse cenário, a proposta da nova planta de ácido cítrico, com uma capacidade de produção de 33 mil toneladas por ano, visa não apenas substituir as importações, mas também contribuir para a exportação, promovendo um equilíbrio na balança comercial do produto. Essa iniciativa busca fortalecer a autonomia do Brasil na produção desse insumo essencial, posicionando o país como um *player* competitivo tanto no mercado doméstico quanto no internacional de ácido cítrico.

Além disso, a escolha de utilizar resíduos da laranja como matéria-prima para a produção de ácido cítrico acrescenta um elemento estratégico e sustentável a essa

proposta. Vale ressaltar que o Brasil não apenas lidera a produção global de laranjas in natura, mas também é o principal fornecedor mundial de suco de laranja. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o Brasil foi responsável por mais de 67% da produção mundial de suco de laranja em 2016/17, contribuindo com 79% das exportações mundiais desse produto (USDA, 2018). Ao integrar a cadeia produtiva do suco de laranja com a produção de ácido cítrico, o Brasil não só reduz a dependência de fontes externas, mas também agrega valor aos resíduos, fortalecendo a sustentabilidade e a competitividade do setor.

3.1 Estimativa de Investimento

O investimento total para a implementação de uma unidade produtiva pode ser dividido em dois, o investimento fixo e o capital de giro.

O investimento de capital fixo representa o custo total do projeto, incluindo a construção e instalação da planta, bem como as mudanças necessárias para preparar o local e todos os bens, tangíveis ou intangíveis, vinculados ao projeto (TOWLER & SINNOTT, 2013). Esse investimento fixo é composto por:

- *Inside Battery Limits Plant Cost* (ISBL): refere-se a todos os elementos diretamente associados ao processo produtivo dentro dos limites da unidade, abrangendo desde os custos de aquisição e instalação de equipamentos e instrumentos até as despesas relacionadas ao terreno e às obras.
- *Outside Battery Limits Plant Cost* (OSBL): representa os custos de infraestrutura adicionais necessários para acomodar a construção e operação da nova planta, como por exemplo, equipamentos de utilidades, geradores e instalações elétricas, laboratórios, escritórios, vestiários, oficinas, cantinas, serviços de emergência, dentre outros.
- Custos de Engenharia: incluem os custos de design e detalhamento do projeto e outros serviços de engenharia necessários. Este componente torna-se relevante uma vez que muitas empresas não dispõem de uma equipe de engenheiros suficiente para conduzir um projeto de planta industrial. Portanto, é comum a contratação de uma ou mais empresas de engenharia para essas finalidades.
- Encargos de Contingência: são custos extras adicionados no orçamento do projeto para lidar com possíveis variações ou erros nas estimativas iniciais e eventuais problemas inesperados, como alterações nos custos dos equipamentos, flutuações no câmbio, mudanças no escopo do projeto.

Já o capital de giro consiste no dinheiro adicional necessário, além do custo de construção, para iniciar a operação da planta e mantê-la em funcionamento até que comece a gerar receita. Seu valor pode variar de 5% do investimento fixo para um processo simples de um único produto, com pouco ou nenhum armazenamento de produto acabado, a até 30% para processos que produzem uma gama diversificada

de produtos para mercados mais sofisticados, enquanto em plantas petroquímicas, uma estimativa comum é de 15% do capital fixo (TOWLER & SINNOTT, 2013). Sendo assim, adotou-se o valor de 10% do investimento fixo inicial para a estimativa do capital de giro.

Determinados os componentes do investimento total, é possível estimá-lo através das seguintes correlações empíricas:

Quadro 2 - Correlações empíricas para estimação de Investimento Total

| Parâmetro | Correlação |
|--------------------------|--------------------------|
| Investimento fixo | $IF = I1 + I2 + I3 + I4$ |
| ISBL | $I1$ |
| OSBL | $I2 = 0,4 * I1$ |
| Custos de Engenharia | $I3 = 0,2 (I1 + I2)$ |
| Encargos de Contingência | $I4 = 0,1 * (I1 + I2)$ |
| Capital de Giro | $CG = 0,1 * IF$ |
| Investimento Total | $IT = IF + CG$ |

Fonte: adaptado de Towler e Sinnott, 2013

Manipulando as correlações acima de forma a obter o Investimento Fixo (IF) em função apenas do ISBL (I1), tem-se que:

$$IF = I1 + I2 + I3 + I4 \quad (1)$$

$$IF = I1 + 0,4 * I1 + 0,2 * (I1 + 0,4 * I1) + 0,1 * (I1 + 0,4 * I1) \quad (2)$$

$$IF = 1,82 * I1 \quad (3)$$

Portanto,

$$ISBL = \frac{IF}{1,82} \quad (4)$$

Faz-se necessário, então, utilizar alguma metodologia preditiva para estimar o Investimento Fixo, a fim de permitir o cálculo dos demais parâmetros e encontrar o Investimento Total. Um desses métodos, amplamente utilizado, é o descrito por Peter e Timmerhaus (1991), o qual estima o investimento fixo a partir do custo total dos equipamentos principais (PETER & TIMMERHAUS, 1991). Este mesmo método foi utilizado por Wang et al. (2020) no estudo *'Techno-economic analysis and environmental impact assessment of citric acid production through different recovery methods'*, no qual as faixas percentuais correspondentes de cada componente do investimento fixo foram ajustadas especificamente para uma unidade de produção de ácido cítrico, conforme mostrado na Tabela 7 (WANG et al., 2020).

Tabela 7 - Estimativa do investimento fixo a partir do custo dos equipamentos principais

| Item | Faixa percentual correspondente (%) |
|------------------------|-------------------------------------|
| a. Custo Direto (CD) | |
| Equipamentos | E |
| Instalação | 35% E |
| Tubulações | 31% E |
| Instrumentação | 13% E |
| Isolamento | 5% E |
| Elétrica | 10% E |
| Edifícios | 10% E |
| Área Externa | 9% E |
| Instalações auxiliares | 10% E |
| b. Custo Indireto (CI) | |
| Engenharia | 32% CD |
| Construção | 34% CD |
| c. Outros Custos (OC) | |
| Contratante | 5% (CD + CI) |
| Contingência | 10% (CD + CI) |
| Investimento Fixo (IF) | CD + CI + OC |

Fonte: adaptado de WANG et al., 2020

Uma forma eficiente de fazer uma estimativa aproximada do custo da planta é escalá-la a partir do valor dos equipamentos para uma planta conhecida. Sendo assim, é necessário utilizar fatores de correção tanto para localização quanto para o tempo, além da cotação do dólar, conforme a equação abaixo, adaptada de Towler e Sinnott (2013):

$$I_2 = I_1 * \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^n * FL * IC \quad (5)$$

Na qual, I_2 representa o investimento dos equipamentos a ser calculado para uma planta de capacidade de processamento C_2 , enquanto I_1 é o investimento dos equipamentos usados como referência para uma planta semelhante com capacidade C_1 . O fator de extrapolação n reflete a economia de escala, o fator de localização FL corrige os valores com base nas diferenças de custo decorrentes da localização diferente entre a planta a ser instalada e a planta usada como referência, e o índice de correção temporal IC atualiza o valor de referência para os dias atuais.

3.2 Estimativa de Custos de Produção

Os custos de produção desempenham um papel crucial em projetos de plantas químicas, e sua compreensão detalhada é essencial para uma avaliação precisa da viabilidade econômica de um projeto e para a tomada de decisões estratégicas ao longo do ciclo de vida da planta. Esses custos são divididos em duas categorias principais: custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos são despesas que permanecem constantes, independentemente da produção da planta, enquanto os custos variáveis variam com a taxa de produção. A seguir serão detalhadas as particularidades de cada um e como é possível estimá-los.

3.2.1 Custos Fixos de Produção

Como apresentado acima, os custos fixos de produção são aqueles que não são afetados diretamente pela quantidade produzida na unidade, correspondendo a despesas gerais associadas a manutenções e atividades administrativas que não estão diretamente relacionadas à produção. Isso significa que se a planta reduzir sua produção, esses custos não são reduzidos.

Os custos fixos também desencorajam a construção de pequenas plantas, uma vez que, ao aumentar o tamanho da planta, os custos com mão de obra, supervisão e despesas gerais geralmente não aumentam proporcionalmente. Isso, aliado às economias de escala no investimento de capital, confere às plantas maiores maior flexibilidade para reduzir preços e, assim, forçar plantas menores a sair do mercado durante declínios no ciclo econômico (TOWLER & SINNOTT, 2013).

Dentre os principais custos fixos estão os custos com mão-de-obra, manutenção, e seguro, os quais serão explorados, individualmente, abaixo.

3.2.1.1 Custos de Mão-de-Obra

A maioria das plantas industriais opera em turnos, nos quais os operadores se alternam em escalas durante jornadas de trabalho de 8 horas diárias. Em média, um único operador trabalha 48 semanas por ano, considerando 4 semanas de férias, operando 8 horas diárias, 5 dias por semana, totalizando 240 turnos de operação por ano (48 semanas/ano multiplicadas por 5 turnos/semana) (SEBRAE, 2023).

Uma planta opera 24 horas por dia, o que equivale a 3 turnos por dia. Considerando uma planta que opere durante 330 dias por ano, são requeridos 990 turnos de operação por ano (330 dias de operação/ano multiplicados por 3 turnos/dia). O número de operadores necessários para este volume de turnos é calculado como 990 turnos/ano divididos por 240 turnos/operador/ano, resultando em 4,125 operadores contratados para cada operador efetivamente atuando na área de produção.

Já os gerentes e engenheiros que compõem a equipe de supervisão geralmente seguem o horário comercial e não aderem ao regime de turnos. Sua responsabilidade muitas vezes abrange a supervisão de operações em várias instalações simultaneamente. Do ponto de vista contábil, é como se apenas uma fração específica de seu tempo fosse dedicada a uma unidade específica. Portanto, ao calcular detalhadamente o custo total da mão de obra por turno, é necessário separá-los dos operadores que trabalham em turnos. Uma abordagem prática para contabilizá-los é representar a supervisão que realizam por meio de uma porcentagem fixa do valor total dos salários dos operadores de turnos existentes. Geralmente, essa taxa é calculada entre 20 e 25% (CHAUVEL; FOURNIER; RAIMBAULT, 2003). Para os propósitos deste trabalho, foi adotada a taxa de 25% do salário dos operadores como representativa do custo de supervisão e gerência.

Portanto, faz-se necessário estimar o número de operadores que trabalharão na unidade, o que pode ser feito através da seguinte relação, proposta por Turton et al. (2012):

$$N_{OL} = \left(6,29 + 31,7P^2 + 0,23N_{np} \right)^{0,5} \quad (6)$$

Sendo:

N_{OL} : número de operadores por unidade da planta.

P : número de processos envolvendo sólidos particulados, como transporte e distribuição, controle de tamanho de partículas, remoção de partículas.

N_{np} : número de etapas de processos de materiais não particulados, como compressão, aquecimento, resfriamento, mistura, separação e reação.

Após o cálculo do número de operadores, em posse de dados sobre o salário destes, é possível estimar o custo total de mão de obra. É importante ressaltar que esta é uma simplificação do cálculo, pois não é possível, com base nos dados disponíveis, quantificar com exatidão o número de funcionários para a planta com a capacidade desejada.

Em relação aos encargos trabalhistas – relativos a férias, décimo terceiro salário, fundo de garantia ao tempo de serviço, licenças, adicionais, vale transporte e outros benefícios -, de acordo com um documento elaborado para o Senado Federal, considerando um salário hipotético de R\$100,00, o desembolso total do empregador atinge R\$153,80 (CAVALCANTE, 2020). Dessa forma, os encargos trabalhistas foram computados como 53,80% do salário nominal.

3.2.1.2 Custos de Manutenção

A gestão dos custos de manutenção em uma planta de ácido cítrico desempenha um papel crucial para uma operação eficiente e na maximização da vida útil dos equipamentos. Esses custos abrangem uma variedade de elementos, incluindo mão de obra especializada para realizar as atividades de manutenção, aquisição de peças de reposição e supervisão necessárias para garantir a integridade dos equipamentos ao longo do tempo. Compreender e otimizar esses custos é vital, considerando as demandas específicas da produção de ácido cítrico, que envolve processos complexos de fermentação e purificação. A realização de atividades de manutenção preventiva, como a inspeção regular dos equipamentos, é essencial para evitar falhas operacionais e garantir a continuidade do processo produtivo. Essas atividades podem ser planejadas, como na manutenção preventiva durante paradas programadas, ou emergenciais, como na manutenção corretiva em resposta a falhas operacionais ou defeitos nos equipamentos.

Sendo assim, a avaliação precisa dos custos de manutenção, em relação ao custo total de aquisição e instalação dos equipamentos, é fundamental para uma gestão financeira eficaz, contribuindo para a sustentabilidade e competitividade da planta de ácido cítrico no mercado. Towler e Sinnott (2013) destacam que, em média, os custos de manutenção podem representar entre 3% e 5% do ISBL. Nesse estudo, o valor adotado será de 5%.

3.2.1.3 Custos com Seguro

Os custos com seguro são necessários para qualquer unidade industrial como forma de gestão de riscos e na proteção dos ativos da instalação. Esse tipo de cobertura geralmente inclui proteção contra eventos imprevistos, como incêndios, danos causados pelo clima, acidentes, responsabilidade civil e interrupções na produção.

O valor gasto com o seguro de uma planta química é difícil de estimar, pois depende de diversos fatores como a natureza da operação, a escala de produção e os tipos de produtos envolvidos. Como estimativa inicial, é proposto por Towler e Sinnott (2013) a proporção de 1 a 2% do ISBL para os custos com seguros. Tendo em vista que a produção de ácido cítrico, apesar de ter um grau maior de complexibilidade por compreender um processo fermentativo, não envolve o uso de muitas substâncias perigosas nem equipamentos muito complexos, considerou-se o percentual de 1% para elaboração do estudo.

3.2.2 Custos Variáveis de Produção

Os custos variáveis de produção são as despesas proporcionais à produção ou taxa de operação da planta. Nesse sentido, estão inclusos todos os insumos consumidos durante a produção, como por exemplo os custos de aquisição de matéria-prima

consumidas pelo processo; os custos de utilidades, como vapor, água de resfriamento e eletricidade; e os custos com consumíveis, como solventes, ácidos, bases, materiais inertes e inibidores de corrosão. Normalmente, os custos variáveis podem ser reduzidos por meio de um design ou operação mais eficientes da planta (TOWLER & SINNOTT, 2013). Nesse estudo, também serão contabilizados os custos associados aos resíduos gerados durante a produção do ácido cítrico.

3.2.2.1 Custos de Matéria-Prima

Na indústria química, os custos associados à matéria-prima geralmente compõem a maior parcela dos custos variáveis de produção. A determinação desses custos pode parecer simples, calculando-se o preço unitário de aquisição da matéria-prima multiplicado pela quantidade total necessária no processo, esta última derivada do balanço material realizado. No entanto, a complexidade reside na obtenção de um preço unitário confiável para a matéria-prima.

O custo de aquisição da matéria-prima pode ser dividido em duas partes: uma representando o custo de obtenção e outra representando o custo de transporte. Uma abordagem mais conservadora poderia envolver ainda o desconto do custo de oportunidade, ou seja, considerar o retorno proveniente de alternativas possíveis de aplicação do resíduo cítrico diferente da utilização proposta neste trabalho. O principal encaminhamento dos resíduos do processamento da laranja, atualmente, é para a produção de ração animal. Sendo assim, é comum que as empresas de suco vendam seus resíduos para fazendas de gado, e, portanto, esse custo de aquisição será considerado no cenário base.

Para as demais matérias primas necessárias ao processo (água, Ágar Batata Dextrose, *Aspergillus niger*, hidróxido de cálcio e ácido sulfúrico), é necessário calcular os coeficientes técnicos com base no balanço de massa para depois multiplicá-lo pelo preço unitário, obtido através de diferentes fontes, e produção de ácido cítrico total.

3.2.2.2 Custos de disposição de subprodutos do processo

Além das entradas do processo, é essencial considerar no estudo de viabilidade eventuais custos que possam ser relacionados às saídas do mesmo. Os custos de disposição de subprodutos do processo referem-se aos gastos associados à eliminação ou gestão dos subprodutos gerados durante um processo produtivo. Esses custos podem incluir despesas relacionadas ao descarte adequado, reciclagem, reutilização ou tratamento ambientalmente responsável desses subprodutos. A gestão eficiente desses custos é relevante para empresas que buscam práticas sustentáveis e conformidade ambiental em suas operações. Nesse contexto, a rota de produção de ácido cítrico estudada tem 3 subprodutos que devem ser contabilizados, são eles:

- Água residual oriunda dos processos de remoção de umidade da polpa cítrica (moagem, prensagem e secagem) e dos processos de filtração na etapa de recuperação do produto final. Esta pode ser tratada para reuso ou irrigação na própria instalação ou então ser encaminhada para estações de tratamento. Porém, de uma forma ou de outra, existe um gasto associado ao encaminhamento dessa água.
- O resíduo “vivo”, que contém microrganismos, proteínas, aminoácidos, açúcar, oriundo da fermentação e pode ser seco e usado como ração para animais (GODOY et al., 2018). Portanto, também se apresenta como um gasto para disposição final;
- O sulfato de cálcio, também conhecido como gesso agrícola, produzido durante a etapa de recuperação do produto final. Em alguns casos, esse pode ser tratado e fornecido como matéria-prima para as fábricas de cimento, uma vez que é facilmente transformado em gesso mediante a hidratação. Entretanto, como esse gesso está contaminado com biomassa, ele tem pouco ou nenhum valor comercial e será apenas tratado para a disposição final, representando, igualmente aos demais, um custo (BRASIL, LIMA, CRAVO, 2018; NIKULICHEVA, et al, 2021; HARRISON et al., 2015).

3.2.2.3 Custos de Utilidades e Consumíveis

Em uma planta industrial, as utilidades abrangem os serviços auxiliares essenciais para qualquer processo produtivo, incluindo o consumo de energia elétrica, fluidos para aquecimento ou resfriamento de correntes de processo, água de processo, ar comprimido, vapor, entre outros. Essas utilidades podem ser geradas internamente, com seu custo determinado pelas despesas associadas à geração e transmissão, ou adquiridas de terceiros, com o valor definido por contrato. O custo das utilidades varia conforme a quantidade consumida, a localização e a presença de incentivos. Estimar esse custo específico é mais complexo do que o custo de matéria-prima, exigindo a definição prévia do balanço material e energético da unidade. Towler e Sinnott (2013) indicam que os custos com utilidades geralmente não ultrapassam 15% do custo total de produção, sendo 7% uma estimativa inicial razoável.

Já os custos com consumíveis, de forma geral, envolvem principalmente gastos com produtos químicos, solventes, catalisadores, entre outros. No processo proposto, essas despesas concentram-se no hidróxido de cálcio e no ácido sulfúrico utilizado na etapa de recuperação do produto final e nos fungos usados durante a fermentação. Towler e Sinnott (2013) sugerem uma estimativa inicial de 3% do custo total de produção para os custos de consumíveis.

Desta maneira, como ambos os custos acima podem ser calculados em função do custo total de produção, sendo necessário utilizar as relações abaixo para estimá-lo:

Definindo:

CTP - Custos Totais de Produção;

CVP - Custos Variáveis de Produção;

CFP - Custos Fixos de Produção;

CMP - Custos com Matéria-Prima

CDS - Custos de Disposição de Subprodutos

CUT - Custos de Utilidades

CCO - Custos de Consumíveis

$$CTP = CVP + CFP \quad (7)$$

$$CVP = CMP + CDS + CUT + CCO \quad (8)$$

$$CUT = 0,07 * CTP \quad (9)$$

$$CCO = 0,03 * CTP \quad (10)$$

Manipulando essas relações pode-se obter:

$$CTP = \frac{CMP + CFP + CDS}{0,9} \quad (11)$$

3.2.3 Despesas Operacionais

As despesas operacionais são gastos que não possuem relação direta com a produção e podem ser categorizados em três grupos principais de despesas associadas ao projeto, conforme descrito por Towler e Sinnott (2013): Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), marketing e vendas, e despesas administrativas (TOWLER & SINNOTT, 2013).

Os gastos relacionados à P&D abrangem todo o processo de desenvolvimento de novas tecnologias e produtos na indústria, variando significativamente de acordo com a natureza das atividades da empresa. Towler e Sinnott (2013) indicam que esses gastos geralmente variam de 1% da receita para empresas petroquímicas a 15% para as farmacêuticas.

Os gastos associados a marketing e vendas correspondem aos gastos relacionados à aquisição de novos clientes, divulgação de produtos e pesquisas de mercado. Essa parcela é frequentemente negligenciada por produtores com pouca diversificação, como os de commodities, mas pode representar até 5% do custo total de produção para produtos de maior valor agregado (TOWLER & SINNOTT, 2013).

As despesas administrativas compreendem todos os gastos relacionados aos setores administrativos do projeto, incluindo gerência geral, recursos humanos, setores financeiro e jurídico, compras, entre outros.

Como uma estimativa inicial para as despesas operacionais, será adotado um valor correspondente a 65% dos custos com mão de obra, conforme proposto por Towler e Sinnott (2013).

3.2.4 Imposto de Renda

No Brasil, as empresas estão sujeitas às diretrizes de tributação determinadas pela Receita Federal, especialmente através do Imposto sobre Pessoas Jurídicas (IRPJ). Essa obrigação fiscal implica uma alíquota de 15% sobre o lucro líquido da empresa. Para aquelas que apresentarem lucro superior a R\$20.000,00 multiplicado pelo número de meses do respectivo período de apuração, há uma alíquota adicional de 10% aplicada após a dedução inicial. Adicionalmente, é importante considerar a contribuição social (CSLL) que corresponde a 9% do lucro líquido. Dessa maneira, a alíquota global a ser aplicada totaliza 34%, incidente sobre o lucro real, apurado após a depreciação (EBIT) no DRE (IPEA, 2015).

3.2.5 Depreciação

Os encargos de depreciação são uma forma comum de dedução fiscal frequentemente utilizada pelos governos como incentivo ao investimento. A depreciação, considerada uma despesa não monetária, ou não desembolsável, tem o efeito de reduzir a receita para fins fiscais, mas não implica em uma saída de caixa imediata. Esse conceito refere-se à desvalorização gradual de ativos ao longo do tempo, servindo como uma reserva para futura reposição ou substituição de equipamentos. Neste contexto, optou-se por adotar a metodologia de depreciação linear, uma vez que, para fábricas de produtos químicos, o valor residual é comumente considerado zero, especialmente quando a operação se estende além do final da vida útil depreciável, que, neste caso, é estabelecida em 20 anos. Essa determinação baseia-se no horizonte de planejamento e cronograma de partida. O cálculo específico da metodologia de depreciação linear pode ser visualizado abaixo:

$$D = \frac{IF}{n} \quad (12)$$

Na qual, IF é o investimento fixo no período de depreciação a partir do início da operação.

3.3 Estimativa de Receitas

As receitas de uma unidade produtiva consistem no valor arrecadado a partir da venda dos produtos e subprodutos gerados ao longo do processo. Entretanto, na unidade de produção avaliada neste estudo, os subprodutos do processo não serão contabilizados como receita, visto que a água residual, após ser tratada, será reintegrada ao ciclo interno da própria unidade para ser reutilizada; o “resíduo vivo”, embora existam estudos indicando sua potencial aplicação na nutrição animal, esta oportunidade demanda uma análise mais aprofundada para determinar seu valor de mercado de maneira mais precisa; e o sulfato de cálcio, que por estar contaminado com biomassa, possui pouco ou nenhum valor comercial sem tratamento adequado, o qual ainda não foi 100% desenvolvido e requer maiores investigações para que se determine um processo eficaz. Assim, a estimativa de receita pode ser obtida multiplicando-se o preço unitário de venda do ácido cítrico pela quantidade total produzida.

3.4 Elaboração das Demonstrações Contábeis

Após estimar o investimento total da planta e identificar todos os custos fixos e variáveis relevantes, é necessário adotar premissas relacionadas à taxa de ocupação, projeção da construção, início da produção e horizonte de operação. Essas premissas são essenciais para a elaboração das demonstrações contábeis, como a Demonstração do Resultado do Exercício (DRE) e a Demonstração do Fluxo de Caixa (DFC). Essas demonstrações servirão como base para a aplicação dos métodos de análise de pré-viabilidade econômica preliminar do projeto.

Um cronograma de inicialização típico para plantas químicas, proposto por Towler e Sinnott (2013), contempla as seguintes etapas: no primeiro ano, ocorre o trabalho de engenharia e o detalhamento do projeto, priorizando itens que demandam projetos e fabricação mais extensos, representando 30% do investimento fixo inicial. No segundo ano, concentram-se as atividades de aquisição e construção, totalizando 60% do investimento fixo inicial. O terceiro ano destina-se aos 10% restantes para a conclusão das obras, concomitante ao início da produção.

Adotando o mesmo cronograma, a operação da planta tem início no terceiro ano de construção, alcançando uma capacidade inicial de 30%. No quarto ano, ocorre a fase de adaptação da operação, elevando a capacidade para 70%. A partir do quinto ano, prevê-se que a produção opere em sua capacidade total.

O Quadro 3 resume as premissas adotadas nos 5 primeiros anos do cronograma típico de inicialização:

Quadro 3 - Cronograma Típico de Inicialização

| Ano | Custos | Receita | Detalhamento |
|-----|--|-------------------------------|---|
| 1 | 30% do investimento fixo | 0 | Engenharia e itens de longo prazo |
| 2 | 60% do investimento fixo | 0 | Aquisição e construção |
| 3 | 10% do investimento fixo + capital de giro + custos fixos + 30% dos custos variáveis | 30% da receita base estimada | Restante de construção e produção inicial |
| 4 | Custos fixos + 70% dos custos variáveis | 70% da receita base estimada | Teste operacional da planta |
| 5 + | Custos fixos + custos variáveis | 100% da receita base estimada | Operação em capacidade máxima |

Fonte: elaboração própria a partir de Towler e Sinnott, 2013

No cenário base, a partir do quinto ano a planta será operada à sua capacidade máxima de 100%, com o propósito de avaliar a viabilidade econômica no cenário mais otimista. Caso o projeto demonstre ser rentável nessas condições ideais, será considerado o impacto de taxas de ocupação realistas em fases subsequentes.

Quanto ao horizonte de planejamento, serão considerados 20 anos, sendo os dois primeiros anos para a construção da unidade e início da operação a partir do terceiro, como demonstrado acima. Dessa forma, chega-se ao número 18 anos considerado para o tempo de depreciação da unidade.

Uma observação importante a ser levada em consideração no momento de montar as demonstrações contábeis é de que 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).

3.5 Indicadores de viabilidade econômica

Em um estudo de pré-viabilidade econômica é crucial analisar alguns indicadores econômicos que oferecem resultados tanto qualitativos quanto quantitativos e podem ser obtidos através da construção do fluxo de caixa e do Demonstrativo do Resultado do Exercício (DRE). Portanto, utilizando como base todas as estimativas descritas e premissas adotadas nas seções anteriores, é possível analisar os aspectos econômicos do projeto a partir da construção desses demonstrativos. Esses métodos são amplamente empregados na avaliação preliminar da atratividade de um projeto, no entanto, não são os mais adequados para um nível de detalhamento muito profundo, dada a quantidade de premissas assumidas e algumas simplificações adotadas (TOWLER & SINNOTT, 2013).

O *payback*, um dos indicadores mais simples, desempenha um papel essencial na avaliação de investimentos. Neste trabalho, a opção foi pela metodologia de *payback* descontado, que vai além do simples cálculo temporal de retorno. Essa abordagem incorpora o custo de oportunidade do capital da empresa, considerando o valor da alternativa mais vantajosa abandonada em favor da escolhida, medido pela taxa mínima requerida de juros ou custo de capital. A simplicidade do *payback* torna-o uma ferramenta valiosa, indicando não apenas o período de retorno de investimento, mas também proporcionando uma visão geral sobre a rentabilidade do projeto, na qual um *payback* mais curto sugere maior atratividade financeira (TURTON, 2012). O seu modelo matemático pode ser observado abaixo:

$$\sum_{t=0}^{payback} \frac{FC_t}{(1+k)^t} = 0 \quad (13)$$

No qual:

FC_t - Fluxo de caixa para o período de planejamento

k - Taxa mínima de juros

t - Período de retorno (ou *payback*)

Outro indicador é o Valor Presente Líquido (VPL), que consiste no somatório dos fluxos de caixa ao longo do horizonte de planejamento, descontados pela Taxa Mínima de Atratividade (TMA), representando a taxa de desconto utilizada no cálculo. Seu propósito é trazer os fluxos de caixa de cada ano do projeto para um valor presente, considerando a variação anual nas despesas e receitas. Ao descontar os fluxos de caixa futuros, o VPL oferece uma visão mais precisa do valor do dinheiro no tempo, sendo uma ferramenta crucial na tomada de decisões sobre a viabilidade econômica do projeto. É particularmente útil para determinar se a taxa de retorno supera a TMA estabelecida, indicando a atratividade financeira do investimento (TOWLER; SINNOTT, 2013). O VPL pode ser calculado pela seguinte equação:

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} = 0 \quad (14)$$

Na qual:

FC_j - Fluxo de caixa para o período de planejamento

i - Taxa de desconto (no caso, a TMA)

j - Horizonte de planejamento do projeto

A TMA pode ser definida como a maior taxa de juros que deixa de ser obtida ao escolher o investimento proposto em vez da melhor alternativa disponível. Em outras palavras, é a taxa mínima que um investidor aceita receber a partir de uma aplicação financeira. Portanto, a TMA não apenas reflete o custo de oportunidade do projeto, mas também está relacionada ao custo de capital, abrangendo tanto o capital próprio quanto o de terceiros, como empréstimos e financiamentos. A determinação da TMA pode envolver fatores como a taxa básica de juros do país, levando em consideração a liquidez e o risco do projeto. No contexto de baixo risco, a taxa SELIC pode ser um indicador adequado como estimativa inicial para determinar a TMA. Sendo assim, o valor de 12,25% de novembro de 2023 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023) será utilizado neste estudo.

Após calcular o Valor Presente Líquido (VPL) para diversas taxas de juros, incluindo a TMA, surge a Taxa Interna de Retorno (TIR). Essa taxa é aquela que anula o VPL acumulado ao final do projeto, representando a máxima taxa de juros que o projeto pode suportar e ainda assim ser financeiramente equilibrado ao longo de sua vida útil (TOWLER; SINNOTT, 2013). Sendo assim, para que o investimento estudado seja vantajoso economicamente, a taxa de retorno sobre o investimento (TIR) deve ser maior ou igual à TMA.

Inicialmente, o investimento, os custos, os demonstrativos e os indicadores são calculados em um cenário base, utilizando hipóteses e estimativas para os valores desses parâmetros. Após essa etapa, realiza-se a análise de sensibilidade, que consiste em variar um parâmetro escolhido, mantendo os demais fixos. Essa abordagem permite avaliar o impacto da variação desse parâmetro nos fluxos de caixa e, por conseguinte, nos resultados finais da análise de pré-viabilidade econômica.

3.6 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste em modificar parâmetros e valores da avaliação econômica, gerando alterações diretas nas entradas e saídas no fluxo de caixa. Essa abordagem permite avaliar a influência e a importância de cada parâmetro modificado nos resultados da viabilidade econômica, tornando possível compreender quais deles representam riscos para o projeto, em maior ou menor grau.

Neste estudo, dado que o objetivo do processo é oferecer uma solução para a destinação do resíduo gerado pelas processadoras de laranja, eliminando um possível passivo para essas empresas, o principal parâmetro a ser sensibilizado é o custo de obtenção desses resíduos. Dessa forma, no cenário base será considerado um custo para os resíduos equivalente ao que é praticado hoje na venda do mesmo para a nutrição animal e na análise de sensibilidade esse valor será gradativamente reduzido até zero.

Além disso, o preço de venda do ácido cítrico é um importante parâmetro do projeto, pois está sujeito a oscilações anuais, como evidenciado pela análise histórica da seção 2.3.1. O cenário base adotado é conservador, considerando uma média dos preços pré-pandemia, sem a aplicação de taxas de conforto² no modelo de precificação utilizado. Dessa forma, serão avaliadas taxas de conforto de 5%, 10% e 20% sobre o preço de venda, além de um cenário mais rigoroso, no qual o preço deve ser ainda inferior ao preço realizado.

Outro importante parâmetro a ser sensibilizado é o investimento, cujo método de previsão realizado, o qual levou em consideração uma planta similar de diferente capacidade, localização e ano, possui uma imprecisão natural. Portanto, dado o papel crucial do investimento na viabilidade do processo, serão explorados diferentes cenários de investimento.

² As taxas de conforto são ajustes aplicados a modelos de precificação para contemplar variações e incertezas nos preços, proporcionando uma margem adicional de segurança ou flexibilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de entrada para as estimativa e cálculos apresentados a seguir baseiam-se em dois estudos: o primeiro realizado por Harrison et al. (2015), o qual elabora uma análise de viabilidade econômica para uma planta de ácido cítrico como exemplo da metodologia desenvolvida e apresentada em seu livro *Bioprocess Design and Economics*; e o segundo de autoria de Wang et al. (2020), já citado anteriormente, que desenvolveu uma análise tecno-econômica da produção de ácido cítrico através de dados coletados das plantas de produção existentes na China em conjunto com o dimensionamento dos equipamentos e a estimativa de custos baseados no software *Aspen Economic Evaluation*. Entretanto, é necessário fazer algumas adaptações, que serão explicitadas na seção 4.2, uma vez que o processo produtivo de ambos os trabalhos de referência em questão utiliza diferentes matérias primas, o melaço e o milho, respectivamente, o que faz com que a etapa de pré-tratamento da matéria-prima seja diferente.

4.1 Escolha da Localização

Na decisão relativa à localização de uma empresa, é crucial considerar uma ampla gama de fatores, incluindo as diversas instalações da empresa, a natureza de seus produtos, as fontes de insumos, a base de clientes, bem como aspectos econômicos, sociais e políticos. Esse processo envolve uma equação complexa e de grande importância estratégica. A localização mais vantajosa é aquela que resulta em benefícios significativos para a empresa, tais como a otimização dos custos operacionais e comerciais, juntamente com a maximização da qualidade dos serviços oferecidos aos clientes (ALVES, 2013). Sendo assim, como o processo produtivo em questão utiliza uma grande quantidade de resíduos do processamento da laranja como insumo, caracterizados por serem uma matéria-prima biodegradável com alto teor de umidade, a seleção de um local próximo às principais indústrias de suco é crucial. Essa proximidade visa garantir a obtenção de um insumo em ótimas condições e, ao mesmo tempo, minimizar os custos associados ao transporte. Vale ressaltar que o produto final é de fácil transporte, reforçando a maior conveniência de estar mais perto da fonte de matéria-prima.

Como já apresentado anteriormente na seção 2.2, o cinturão agrícola de São Paulo e do Triângulo Mineiro é a principal região produtora de laranja e de seu suco no Brasil. Segundo o diretor-executivo da CitrusBR, Ibiapaba Netto, a produção de suco de laranja do Brasil, maior produtor e exportador global, deverá aumentar 25% na temporada 2022/23 e só nessa região a produção total de suco está projetada em cerca de 1,028 milhão de toneladas, versus 821 mil toneladas em 2021/22 (FORBES, 2022).

Nessa região, mais especificamente no município de Matão (SP) encontram-se as maiores produtoras de suco do país, das quais Citrusuco, Citrovita, Cutrale e Louis

Dreyfus, que se destacam pelo tamanho de sua produção (FUNDECITRUS, 2015). A Citrosuco e Citrovita, empresas unidas desde 2010, têm capacidade de processar juntas acima de 40 a 50 por cento de uma safra, o que corresponde a 600 mil toneladas de suco (BIANCONI, 2023). Enquanto isso, a Cutrale, que era a líder de produção até a fusão das empresas acima, produz atualmente entre 450 mil e 500 mil toneladas de suco, em uma safra normal, e poderia aumentar para até 550 mil toneladas, sem realizar investimentos adicionais em maquinários, se a produção da matéria-prima fosse maior (REUTERS, 2023). Já a Louis Dreyfus anunciou em março de 2022 o início da construção de novos tanques de armazenamento para suco de laranja em sua unidade de Matão, o que aumentará a capacidade de produção para 300 milhões de litros por ano (LOUIS DREYFUS, 2022).

No contexto deste trabalho, conforme o balanço de massa apresentado na seção 2.4, para suprir a demanda de resíduos da planta estudada de 542,01 ton/dia, é necessária uma produção de suco de 412.923,08 L/dia, o que representa 143.089,43 ton/ano ou pouco menos de 140 milhões de litros por ano. Comparando essa demanda com a produção de suco apresentada no último parágrafo, pode-se dizer que uma unidade de produção de ácido cítrico instalada nessas proximidades terá acesso a resíduos da laranja em quantidade suficiente para a produção planejada de 100 ton/dia. Portanto, será considerado que a planta estudada nesse trabalho estará localizada no município de Matão, na região Norte do estado de São Paulo.

4.2 Estimativa de Investimento

Harrison *et al.* (2015) estimaram o custo de equipamentos de toda a planta, considerando uma taxa de produção de 2300 kg/h (55,2 ton/dia), no valor de US\$10.370.000,00, porém, sua unidade de ácido cítrico utilizava melão como matéria-prima, o que torna a etapa de pré-tratamento diferente quando comparado ao processo estudado neste presente trabalho, no qual utiliza-se os resíduos do processamento da laranja como matéria-prima, como elucidado na seção 2.4. Faz-se necessário, então, acrescentar o custo de alguns equipamentos e subtrair o custo de outros que não serão necessários:

Equipamentos adicionados ao investimento:

- Prensa Hidráulica: US\$10.720,00 para uma capacidade de 2.000 ton/ano (IFA et al., 2020)
- Secador de Bandeja: US\$254.000,00 para uma capacidade de 83.000 ton/ano (KWAN et al., 2018)
- Moinho de Martelos: US\$63.265,00 para uma capacidade de 19.200 ton/ano (HOFFELDER, 2011)

Como o custo de compra de um determinado equipamento reflete um tamanho de equipamento de referência, os custos individuais dos equipamentos são

dimensionados com base no tamanho do equipamento da cotação original, usando um expoente de dimensionamento apropriado para cada tipo de equipamento – no caso de não ser conhecido o fator para a unidade em análise, adota-se o valor 0,6. Portanto, o custo do equipamento com base no tamanho é calculado usando a seguinte equação:

$$\text{Novo Custo} = \text{Custo Base} * \left(\frac{\text{Nova Capacidade}}{\text{Capacidade Base}} \right)^n \quad (15)$$

Com isso foi calculado um novo custo dos equipamentos para a capacidade do artigo de referência (2300 kg/h), a fim de somar esse valor no total de US\$10.370.000,00:

- Prensa Hidráulica: US\$40.594,53
- Secador de Bandeja: US\$105.164,80
- Moinho de Martelos: US\$64.975,36

Em seguida, deve-se levar em consideração aqueles equipamentos que devem ter o valor subtraído do investimento, dado que não são necessários no processo estudado (dados retirados do próprio estudo de referência de Harrison et al., 2015):

- Coluna Cromatográfica: US\$150.000,00
- Filtro de Placas: US\$145.000,00
- Tanque de Mistura para o melaço: US\$503.000,00
- Fermentador secundário: US\$436.000,00
- Filtro Rotativo a Vácuo: US\$154.000,00
- Compressor Centrífugo: US\$1.560.000,00
- Filtro de ar: US\$137.000,00

A coluna cromatográfica, filtro de placas, tanque de mistura para o melaço e o filtro rotativo a vácuo eram utilizados no preparo do melaço para fermentação e o compressor centrífugo e filtro de ar eram equipamentos auxiliares desses. Já o fermentador secundário só é necessário ao fermentar substratos como o melaço.

Finalmente, o custo total dos equipamentos é US\$7.495.734,69 para uma planta de referência na China com capacidade produtiva de 2300 kg/h no ano de 2012 – ano no qual a unidade do estudo de Harrison et al. (2015) foi projetada.

O próximo passo é fazer os ajustes necessários com os fatores de correção explicitados abaixo, conforme a metodologia descrita na seção 3.1.

O fator de correção para o tempo foi calculado a partir dos índices de correção temporal de plantas de engenharia química, *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI), para os anos de 2012 (ano base do artigo utilizado como referência) e 2023 (ano atual deste estudo):

$$IC = \frac{CEPCI(2023)}{CEPCI(2012)} = \frac{798,7}{584,6} = 1,3662 \quad (16)$$

Para o fator de localização, utilizou-se o proposto por Towler e Sinnott (2013):

$$FL = 1,14 \quad (17)$$

Em relação ao fator de extrapolação, utiliza-se o valor de 0,6 para a indústria química, o que faz com que a equação seja inclusive chamada de “regra dos seis décimos” (TOWLER & SINNOTT, 2013):

$$n = 0,6 \quad (18)$$

Sendo assim, tem-se:

$$I_2 = \$7.495.734,69 * \left(\frac{4166}{2300}\right)^{0,6} * 1,3662 * 1,14 \quad (19)$$

$$I_2 = \$16.675.155,49 \quad (20)$$

Utilizando a cotação de novembro de 2023 do dólar no valor de R\$ 4,90 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023), obtêm-se que a estimativa dos investimentos em equipamento é:

$$I_2 = R\$ 81.708.261,90 \quad (21)$$

Na posse deste valor é possível estimar o investimento fixo e depois o investimento total, conforme a metodologia descrita na seção 3.1:

Tabela 8 - Estimativa do investimento fixo do projeto

| Item | Faixa percentual correspondente (%) | Valor (R\$) |
|------------------------|-------------------------------------|----------------|
| a. Custo Direto (CD) | | |
| Equipamentos | E | 81.708.261,90 |
| Instalação | 35% E | 28.597.891,67 |
| Tubulações | 31% E | 25.329.561,19 |
| Instrumentação | 13% E | 10.622.074,05 |
| Isolamento | 5% E | 4.085.413,10 |
| Elétrica | 10% E | 8.170.826,19 |
| Edifícios | 10% E | 8.170.826,19 |
| Área Externa | 9% E | 7.353.743,57 |
| Instalações auxiliares | 10% E | 8.170.826,19 |
| Total CD | | 182.209.424,04 |
| b. Custo Indireto (CI) | | |
| Engenharia | 32% CD | 58.307.015,69 |
| Construção | 34% CD | 61.951.204,17 |
| Total CI | | 120.258.219,87 |
| c. Outros Custos (OC) | | |
| Contratante | 5% (CD + CI) | 15.123.382,20 |
| Contingência | 10% (CD + CI) | 30.246.764,39 |
| Total OC | | 45.370.146,59 |
| Investimento Fixo (IF) | CD + CI + OC | 347.837.790,49 |

Fonte: elaboração própria a partir de WANG et al., 2020

Tabela 9 - Correlações empíricas para estimação de Investimento Total

| Parâmetro | Correlação | Valor (R\$) |
|--------------------------|--------------------------|----------------|
| Investimento fixo | $IF = I1 + I2 + I3 + I4$ | 347.837.790,49 |
| ISBL | I1 | 191.119.665,10 |
| OSBL | $I2 = 0,4 * I1$ | 76.447.866,04 |
| Custos de Engenharia | $I3 = 0,2 (I1 + I2)$ | 53.513.506,23 |
| Encargos de Contingência | $I4 = 0,1 * (I1 + I2)$ | 95.559.832,55 |
| Capital de Giro | $CG = 0,1 * IF$ | 34.783.779,05 |
| Investimento Total | $IT = IF + CG$ | 382.621.569,54 |

Fonte: elaboração própria a partir de Towler e Sinnott, 2013

4.3 Estimativa de Custos de Produção

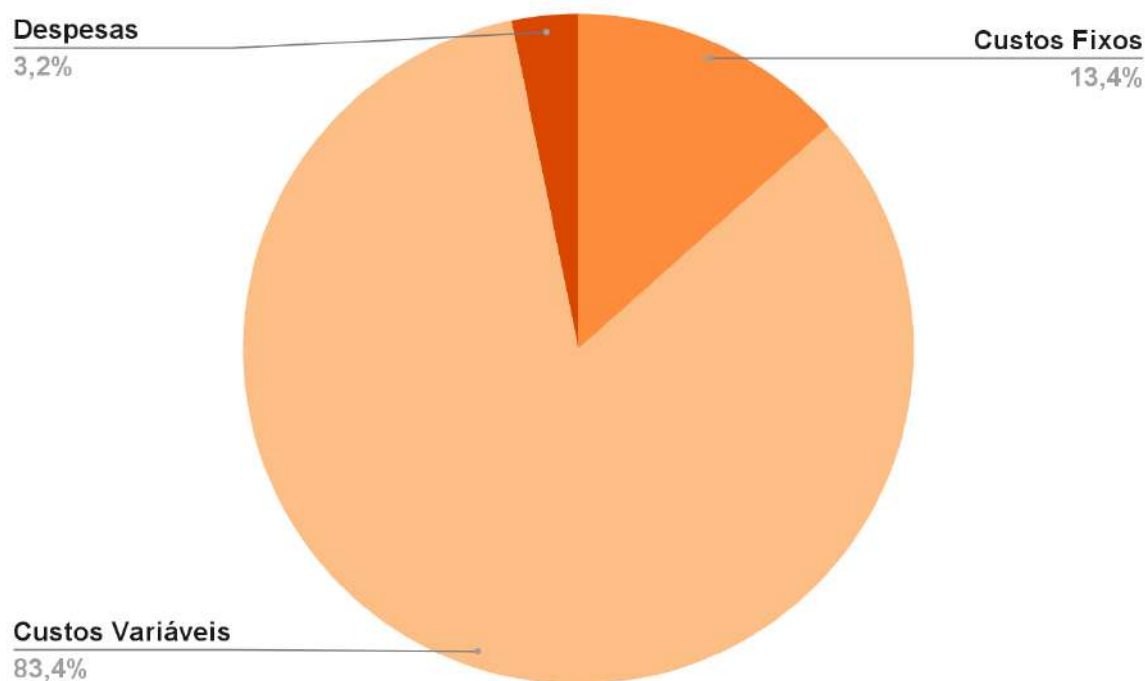
A Tabela 10 e o Gráfico 7 reúnem os valores estimados para gastos totais de produção, cujos cálculos detalhados das parcelas estão descritos nas próximas seções:

Tabela 10 - Componentes gastos totais de produção.

| Componente | Valor (R\$/ano) |
|-----------------------|------------------------|
| Custos Fixos | 18.130.308,98 |
| Custos Variáveis | 112.592.109,55 |
| Despesas operacionais | 4.331.033,90 |
| Total | 130.722.418,53 |

Fonte: elaboração própria

Gráfico 7 - Componentes gastos totais de produção.



Fonte: elaboração própria

4.3.1 Custos Fixos de Produção

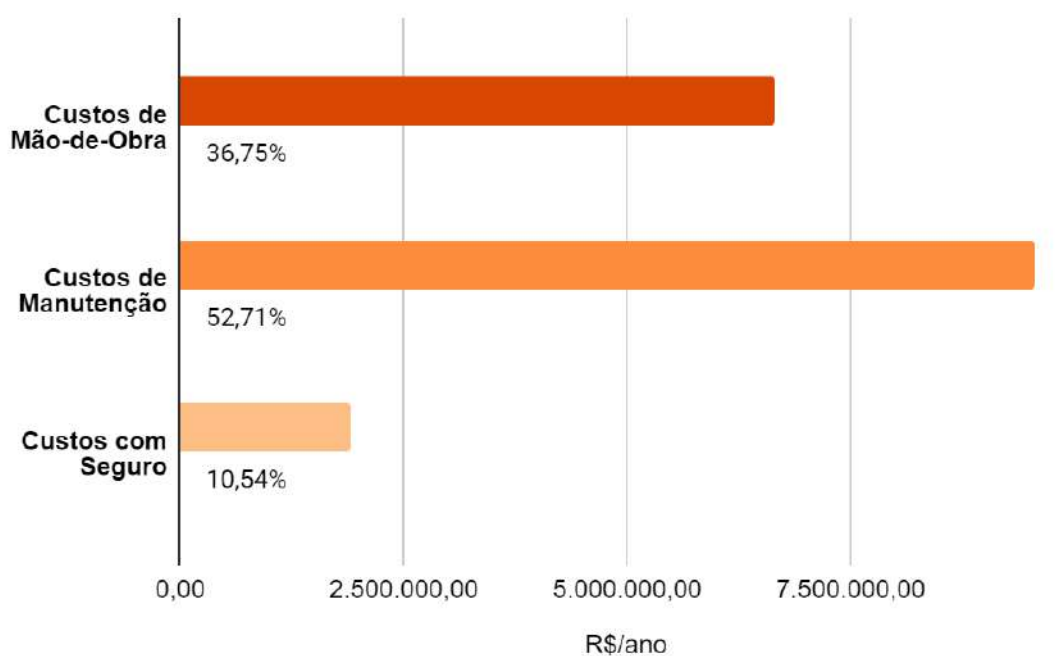
A Tabela 11 e Gráfico 8 reúnem os valores estimados para os custos fixos, cujos cálculos detalhados das parcelas estão descritos nas próximas seções:

Tabela 11 - Componentes do custo fixo.

| Componente | Valor (R\$/ano) |
|-----------------------|------------------------|
| Custos de Mão-de-Obra | 6.663.129,08 |
| Custos de Manutenção | 9.555.983,26 |
| Custos com Seguro | 1.911.196,65 |
| Total | 18.130.308,98 |

Fonte: elaboração própria

Gráfico 8 - Componentes do custo fixo



Fonte: elaboração própria

4.3.1.1 Custos de Mão-de-Obra

De acordo com o estudo “O Custo Total da Mão de Obra no segmento de produtos químicos de uso industrial - CTMO” da ABIQUIM (2018), o salário médio pago por colaborador na indústria química brasileira em 2017 foi de US\$2.453,00 por mês. Para atualizar esse valor para os dias atuais, realizou-se a conversão para a moeda brasileira utilizando a cotação do dólar média do ano de 2017, igual a R\$3,1920 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2023). Para correção temporal, foi utilizado o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) calculado de janeiro de 2018 a outubro de 2023, totalizando 36,62% (IBGE, 2023). Dessa maneira, o valor do salário mensal por trabalhador foi igual a R\$10.697,12 ou R\$128.365,44 ao ano.

Utilizando a relação proposta por Turton et al. (2012):

P : 1 processo envolvendo sólidos particulados (preparo do inóculo).

N_{np} : 11 etapas de processos de materiais não particulados: moagem, prensagem, secagem, fermentação, precipitação de cálcio, filtração e lavagem, tratamento com ácido sulfúrico, filtração, purificação com carvão ativado e cristalização.

$$N_{OL} = (6,29 + 31,7 * 1^2 + 0,23 * 11)^{0,5} = 6,3655 \quad (22)$$

Número de operadores requeridos por turno: 6,3655

Operadores contratados para cada operador atuando na área de produção: 4,125

Mão de obra operacional: $(6,3655) * (4,125) = 26,258 \sim 27$ operadores

Diante dos valores calculados acima, a Tabela 12 mostra os custos de mão de obra levando em consideração não apenas o salário nominal, mas também os encargos adicionais que o empregador é responsável por cobrir, conforme detalhado na seção 3.2.1.

Tabela 12 - Estimativa do custo de mão de obra total

| Item | R\$/ano |
|--------------------------------|--------------|
| Salário médio | 128.365,44 |
| Salário total dos operadores | 3.465.866,88 |
| Custo de supervisão e gerência | 866.466,72 |
| Encargos trabalhistas | 2.330.795,48 |
| Custo de mão de obra total | 6.663.129,08 |

Fonte: elaboração própria

4.3.1.2 Custos de Manutenção

Conforme demonstrado na seção 3.1, o ISBL pode ser calculado a partir do Investimento Fixo (IF):

$$ISBL = \frac{IF}{1,82} = \frac{347.837.790,49}{1,82} = R\$ 191.119.665,10 \quad (23)$$

Portanto, os custos de manutenção podem ser estimados:

$$Custos\ de\ Manutenção = 0,05 * ISBL = R\$9.555.983,26/ano \quad (24)$$

4.3.1.3 Custos com Seguro

Os custos com seguro podem ser estimados como:

$$Custos\ com\ Seguro = 0,01 * ISBL = R\$1.911.196,65/ano \quad (25)$$

4.3.2 Custos Variáveis de Produção

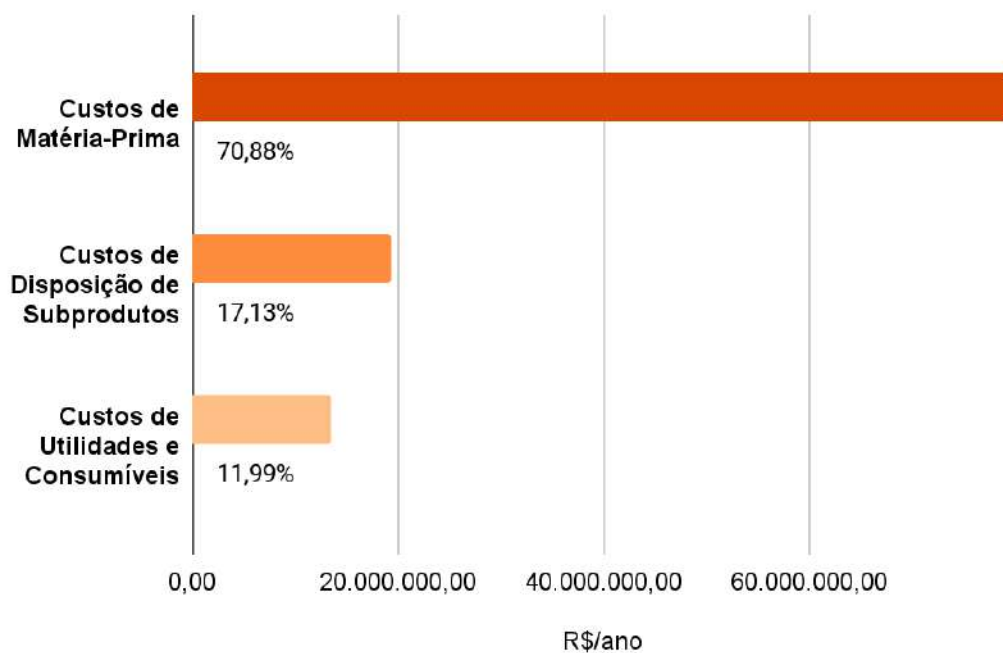
A Tabela 13 e Gráfico 9 reúnem os valores estimados para os custos variáveis, cujos cálculos detalhados das parcelas estão descritos nas próximas seções:

Tabela 13 - Componentes do custo variável

| Componente | Valor (R\$/ano) |
|-------------------------------------|------------------------|
| Custos de Matéria-Prima | 79.804.315,30 |
| Custos de Disposição de Subprodutos | 19.282.449,00 |
| Custos de Utilidades e Consumíveis | 13.505.345,24 |
| Total | 112.592.109,55 |

Fonte: elaboração própria

Gráfico 9 - Componentes do custo variável



Fonte: elaboração própria

4.3.2.1 Custos de Matéria-Prima

Uma das considerações fundamentais ao escolher a localização da planta em Matão (SP) foi a proximidade das unidades extratoras de suco de laranja. Essa decisão visava, principalmente, minimizar a distância necessária para transportar os resíduos até o local de processamento. Conseqüentemente, a parcela relacionada às distâncias percorridas foi assumida como zero. Em virtude da complexidade na estimativa dos custos de transporte, optou-se por adotar um valor arbitrário de US\$4 por tonelada (R\$19,60). Essa escolha foi embasada em um estudo conduzido por Kumar, Cameron e Flynn (2005), no qual os autores realizaram uma revisão bibliográfica de valores de transporte para várias formas de biomassa, apresentando ordens de grandeza semelhantes ao valor adotado.

A Tabela 14 a seguir apresenta o cálculo do custo de cada matéria-prima com base no coeficiente técnico, custo unitário – obtido através de pesquisa em diversas fontes – e tamanho da produção:

Tabela 14 - Estimativa do custo de matéria-prima

| Material | Coefficiente Técnico (ton de material/ton de ácido cítrico) | Custo Unitário (R\$/ton) | Fonte | Custo Total (R\$/ano) |
|--------------------------|--|---|------------------------------|----------------------------------|
| Resíduo de laranja | 5,420 | 200,00 | MF RURAL, 2023 | 35.772.357,72 |
| Resíduo seco | 2,439 | - | - | - |
| Transporte do resíduo | - | 19,60 | KUMAR, CAMERON & FLYNN, 2005 | 3.505.691,06 |
| Água para o substrato | 0,013 | 4,27 | ÁGUAS DE MATÃO, 2023 | 1.839,86 |
| Ágar Batata Dextrose | 0,126 | 6000,00 | MERCK, 2023 | 25.032.124,35 |
| <i>Aspergillus niger</i> | 0,002 | 1507,73 | WANG et al., 2020 | 119.412,22 |
| Hidróxido de cálcio | 0,686 | 442,32 | COMEX STAT, 2023 | 10.013.681,17 |
| Ácido sulfúrico | 0,739 | 219,72 | COMEX STAT, 2023 | 5.359.208,92 |
| Total | | | | 79.804.315,30 |

Fonte: elaboração própria

Dessa forma, o valor total estimado para os custos de matéria-prima é de R\$79.804.315,30/ano.

4.3.2.2 Custos de disposição de subprodutos do processo

A Tabela 15 a seguir apresenta o cálculo do custo necessário à disposição de cada resíduo gerado durante a produção do ácido cítrico com base no coeficiente técnico, custo unitário e tamanho da produção:

Tabela 15 - Estimativa do custo de disposição das saídas do processo

| Material | Coefficiente Técnico (ton de material/ton de ácido cítrico) | Volume gerado (ton/ano) | Custo Unitário (R\$/ton) | Fonte | Custo Total (R\$/ano) |
|--|---|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Sulfato de cálcio (custo de tratamento) | 1,889 | 62.335,62 | 165,62 | WANG et al., 2020 | 10.324.024,97 |
| Resíduo vivo (custo de tratamento) | 2,743 | 90.525,15 | 97,02 | HARRISON et al., 2015 | 8.782.750,23 |
| Água residual (custo de tratamento) | 4,724 | 155.877,37 | 1,13 | WANG et al., 2020 | 175.673,80 |
| Total | | | | | 19.282.449,00 |

Fonte: elaboração própria a partir de WANG et al., 2020

4.3.2.3 Custos de Utilidades e Consumíveis

Utilizando os custos de matéria-prima e os custos fixos de produção, já estimados anteriormente, pode-se calcular o valor do custo total de produção:

$$CTP = \frac{79.804.315,30 + 22.461.342,88 + 19.282.449,00}{0,9} = R\$135.053.452,43/ano \quad (26)$$

Finalmente pode-se obter:

$$CUT = 0,07 * 135.031.339,06 = R\$9.453.741,67/ano \quad (27)$$

$$CCO = 0,03 * 135.031.339,06 = R\$4.051.603,57/ano \quad (28)$$

4.3.3 Despesas Operacionais

As despesas operacionais podem ser estimadas como:

$$Despesas\ Operacionais = 0,65 * Custos\ de\ Mão\ de\ Obra = R\$ \frac{4.331.033,90}{ano} \quad (29)$$

4.4 Estimativa de Receitas

A receita total foi estimada considerando uma taxa de ocupação da capacidade de produção de 100%. O preço de venda do ácido cítrico foi calculado com base na média do preço pré-pandemia de COVID-19, conforme apresentado no Tabela 16:

Tabela 16 - Estimativa das receitas do projeto

| Item | Valor Unitário (\$/kg) | Valor Unitário (R\$/ton) | Fonte | Valor Total (R\$/ano) |
|---------------|------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|
| Ácido Cítrico | 1,30 | 6.370,00 | COMEX STAT, 2023 | 210.210.000,00 |

Fonte: elaboração própria

4.5 Elaboração das Demonstrações Contábeis

A seguir são apresentados, respectivamente, o Demonstrativo de Resultado em Exercício (DRE) e o Demonstrativo de Fluxo de Caixa (DFC), elaborados após as estimativas de investimento e custos do projeto:

Demonstrativo de Resultado em Exercício (DRE)

Tabela 17 - Demonstrativo de Resultado em Exercício (DRE)

| Ano | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Receita Líquida de Vendas | - | - | 63.063.000,00 | 147.147.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 |
| (-) Custo de Produção | - | - | 51.907.941,85 | 96.944.785,67 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 |
| <i>Custo Variável</i> | - | - | 33.777.632,86 | 78.814.476,68 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 |
| <i>Custo Fixo</i> | - | - | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 |
| Lucro Operacional Bruto | - | - | 11.155.058,15 | 50.202.214,33 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 |
| (-) Despesas operacionais | - | - | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 |
| Lucro Operacional (EBITDA) | - | - | 6.824.024,25 | 45.871.180,43 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 |
| (-) Depreciação | - | - | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 |
| Lucro antes do IR | - | - | -12.500.297,44 | 26.546.858,74 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 |
| (-) IR (34%) | - | - | 0,00 | 9.025.931,97 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 |
| Lucro depois do IR | - | - | -12.500.297,44 | 17.520.926,77 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 |

| Ano | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Receita Líquida de Vendas | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 |
| (-) Custo de Produção | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 | 130.722.418,53 |
| <i>Custo Variável</i> | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 |
| <i>Custo Fixo</i> | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 |
| Lucro Operacional Bruto | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 | 79.487.581,47 |
| (-) Despesas operacionais | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 |
| Lucro Operacional (EBITDA) | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 |
| (-) Depreciação | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 | 19.324.321,69 |
| Lucro antes do IR | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 | 55.832.225,88 |
| (-) IR (34%) | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 |
| Lucro depois do IR | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 | 36.849.269,08 |

Fonte: elaboração própria

Demonstrativo de Fluxo de Caixa (DFC)

Tabela 18 - Demonstrativo de Fluxo de Caixa (DFC)

| Ano | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Entradas | | | | | | | | | | |
| Receita Líquida de Vendas | - | - | 63.063.000,00 | 147.147.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 |
| Capital de Giro recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Valor residual do projeto | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Receitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | 0,00 | 0,00 | 63.063.000,00 | 147.147.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 |
| Saídas | | | | | | | | | | |
| Custos Fixos | - | - | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 |
| Custos Variáveis | - | - | 33.777.632,86 | 78.814.476,68 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 |
| Despesas | - | - | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 |
| Investimento Fixo | 104.351.337,15 | 208.702.674,29 | 34.783.779,05 | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro | - | - | 34.783.779,05 | - | - | - | - | - | - | - |
| Imposto (IR) | - | - | 0,00 | 9.025.931,97 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 |
| Total Saídas | 104.351.337,15 | 208.702.674,29 | 125.806.533,85 | 101.275.819,57 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 |
| FC = entrada - saída | -104.351.337,15 | -208.702.674,29 | -62.743.533,85 | 45.871.180,43 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 |
| Ano | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Entradas | | | | | | | | | | |
| Receita Líquida de Vendas | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 |
| Capital de Giro recuperado | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 34.783.779,05 |
| Valor residual do projeto | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Receitas Financeiras | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total Entradas | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 210.210.000,00 | 244.993.779,05 |
| Saídas | | | | | | | | | | |
| Custos Fixos | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 | 18.130.308,98 |
| Custos Variáveis | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 | 112.592.109,55 |
| Despesas | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 | 4.331.033,90 |
| Investimento Fixo | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Capital de Giro | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Imposto (IR) | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 | 18.982.956,80 |
| Total Saídas | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 | 135.053.452,43 |
| FC = entrada - saída | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 75.156.547,57 | 109.940.326,62 |

Fonte: elaboração própria

4.6 Indicadores de viabilidade econômica

A Tabela 19 exibe os indicadores de viabilidade econômica calculados para o cenário base do projeto proposto:

Tabela 19 - Indicadores de viabilidade econômica

| Indicador | Valor |
|---------------------------|---------------|
| VPL (R\$) | 54.995.224,51 |
| TIR (%a.a) | 14,70% |
| Payback descontado (anos) | 14,70 |

Fonte: elaboração própria

Com base nos fluxos de caixa trazidos a valor presente, o Valor Presente Líquido (VPL) calculado ao final da vida útil do projeto é de R\$54.995.224,51. Este resultado sugere que os benefícios financeiros gerados pelos fluxos de caixa futuros superam os custos associados ao projeto nas condições determinadas para o cenário base, indicando a viabilidade econômica do projeto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) calculada para o cenário base é de 14,70% ao ano, superando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) estabelecida em 12,25%. Isso sugere que o projeto oferece uma taxa de retorno que ultrapassa as expectativas iniciais de rentabilidade consideradas aceitáveis. Em outras palavras, significa que o projeto está oferecendo uma taxa de retorno maior do que a expectativa inicial do investidor.

O Payback, que indica o período necessário para recuperar o investimento inicial, é de 14,70 anos. Um payback mais longo é uma consideração importante, pois indica que levará mais tempo para obter o retorno total do investimento. Isso pode influenciar a avaliação da atratividade do projeto, especialmente se os investidores estiverem buscando retornos mais rápidos. Embora esse seja um período relativamente longo, é importante considerar outros fatores, como a natureza do projeto, a estabilidade dos fluxos de caixa e a perspectiva de longo prazo.

Esses resultados positivos enfatizam a viabilidade econômica do projeto de uma unidade industrial voltada à produção de ácido cítrico utilizando resíduos do processamento da laranja. A análise econômica sugere que o investimento é atrativo, proporcionando uma taxa de retorno substancial e benefícios financeiros ao longo de sua vida útil. No entanto, é importante considerar outros fatores, como riscos, prazos, e a natureza do projeto, para uma avaliação completa da viabilidade e atratividade do investimento.

A essência central da unidade industrial proposta neste trabalho vai além da rentabilidade econômica. A proposta de valorizar os resíduos do processamento da laranja, transformando-os em ácido cítrico, levanta questões fundamentais sobre a sustentabilidade ambiental, impacto social e alinhamento com práticas de economia circular. A simples viabilidade econômica não é suficiente para determinar o sucesso desse projeto; é obrigatório questionar se, dentro dessa perspectiva de valorização do resíduo, a instalação de uma planta de ácido cítrico é a opção mais sensata. As considerações precisam abranger aspectos mais amplos, como a contribuição para a redução de resíduos, o papel na economia local e a sustentabilidade a longo prazo. Essa análise abrangente é essencial para garantir que a implementação do projeto esteja alinhada com os objetivos mais amplos de sustentabilidade e responsabilidade social.

Em relação à circularidade associada ao projeto, apesar do aproveitamento inovador do resíduo da laranja para a produção de ácido cítrico, torna-se evidente que esse processo não elimina completamente a geração de resíduos. Pelo contrário, ao processar aproximadamente 180 mil toneladas de resíduos da laranja anualmente, a unidade industrial gera um volume total considerável, atingindo quase 310 mil toneladas de outros resíduos, conforme detalhado na Tabela 15, na seção 4.3.2.2. Esse aumento no volume total de resíduos levanta uma questão de suma importância para a implementação do projeto: a necessidade de encontrar destinações adequadas e sustentáveis para esses subprodutos. A eficácia da economia circular nesse contexto não reside apenas na produção de um produto de maior valor agregado, mas também na gestão responsável e consciente dos resíduos gerados.

Portanto, torna-se decisivo intensificar as pesquisas já existentes, mencionadas na seção 3.3, para otimizar o aproveitamento tanto do sulfato de cálcio quanto do "resíduo vivo" para que seja possível implementar o tratamento eficiente para a destinação adequada destes, para o uso como gesso agrícola e ração animal, respectivamente, assegurando que o ciclo completo do processo contribua verdadeiramente para a sustentabilidade ambiental e ainda configure mais uma fonte de receita para o projeto. Além disso, grande parte desse resíduo é gerado durante o processo de recuperação por precipitação de cálcio, e diante disso, avaliar outras rotas de recuperação do ácido cítrico mostra-se necessário.

4.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade desempenha um papel crucial na compreensão da robustez e vulnerabilidades de um projeto. Neste contexto, o projeto se mostrou, de fato, bastante sensível às variações no preço de aquisição dos resíduos, no preço de venda do ácido cítrico e no investimento necessário ao projeto, revelando a influência significativa que cada variável pode exercer nos resultados de viabilidade econômica. As próximas seções apresentarão uma análise aprofundada dos resultados obtidos e como diferentes cenários e ajustes podem impactar a viabilidade geral do projeto.

4.7.1 Sensibilização do preço de aquisição dos resíduos

Tendo em vista que o principal objetivo da implementação dessa unidade de ácido cítrico é a valorização do resíduo e, portanto, uma enorme quantidade desta matéria-prima será necessária, é razoável considerar a hipótese de que este insumo pode ser obtido a custo menor do que o praticado hoje em dia para a destinação à nutrição animal. Inclusive, mediante a parcerias entre as indústrias, é importante considerar se existe a possibilidade de se obter esses resíduos a custo zero.

Nesse contexto, a Tabela 20 exhibe o comportamento dos indicadores de viabilidade econômica diante da redução do preço de aquisição dos resíduos da laranja junto às indústrias processadoras de suco. Vale destacar que, em todos os cenários, o custo de transporte foi mantido constante em relação ao cenário base.

Tabela 20 - Sensibilização do preço de aquisição dos resíduos da laranja

| Cenário | Variação no preço dos resíduos (%) | Preço dos resíduos da laranja (R\$) | VPL (R\$) | TIR (%a.a) | Payback descontado (anos) |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------|------------|---------------------------|
| Base | - | 200 | 54.995.224,51 | 14,70% | 14,70 |
| 1 | -25% | 150 | 57.930.283,71 | 14,83% | 14,51 |
| 2 | -50% | 100 | 102.516.160,61 | 16,69% | 12,27 |
| 3 | -75% | 50 | 147.102.037,51 | 18,48% | 10,81 |
| 4 | -100% | 0 | 191.687.914,42 | 20,19% | 9,76 |

Fonte: elaboração própria

A variação nos resultados destaca a sensibilidade do projeto ao preço dos resíduos da laranja. Diante de uma redução de 50% no custo de obtenção do resíduo, o valor da VPL praticamente dobra. É evidente que se os resíduos são mais acessíveis, o projeto se torna mais atrativo. Pode-se afirmar, então, que visando a viabilidade econômica do projeto, é imprescindível que se busque parcerias com as empresas processadoras de laranja a fim de baratear o custo de obtenção dos resíduos. Nesse contexto, diversas abordagens podem ser adotadas:

- Uma opção é a formalização de contratos de fornecimento, assegurando um fluxo constante de resíduos por meio de acordos de longo prazo, estabilizando os custos. A gestão conjunta de resíduos também pode ser explorada, com práticas eficientes de coleta e armazenamento, resultando em benefícios operacionais compartilhados;

- A integração vertical, envolvendo a participação direta da empresa processadora na produção de ácido cítrico, representa uma alternativa que cria uma cadeia de valor mais integrada e eficiente. O compartilhamento de recursos e infraestrutura, especialmente em regiões com várias empresas processadoras próximas, emerge como uma estratégia eficaz para reduzir custos.

Os benefícios dessas parcerias são múltiplos e para ambas as partes. Redução de custos, estabilidade no fornecimento, práticas sustentáveis e acesso a redes de distribuição são alguns dos ganhos que contribuem para a viabilidade econômica e a competitividade do projeto. Em síntese, ao priorizar a cooperação estratégica, o projeto não apenas se fortalece financeiramente, mas também se destaca pela responsabilidade ambiental e eficiência operacional.

4.7.2 Sensibilização do preço de venda do ácido cítrico

A Tabela 21 exibe o comportamento dos indicadores de viabilidade econômica diante da variação no preço de venda do ácido cítrico.

Tabela 21 - Sensibilização do preço de venda do ácido cítrico

| Cenário | Varição no preço de venda (%) | Preço de venda do Ácido Cítrico (\$/kg) | VPL (R\$) | TIR (%a.a) | Payback descontado (anos) |
|---------|-------------------------------|---|-----------------|------------|---------------------------|
| 1 | -20% | 1,04 | -154.605.657,97 | 3,98% | - |
| 2 | -10% | 1,17 | -49.805.216,73 | 9,86% | - |
| 3 | -5,25% | 1,23 | 0,00 | 12,25% | 20,00 |
| Base | - | 1,30 | 54.995.224,51 | 14,70% | 14,70 |
| 4 | 5% | 1,37 | 107.395.445,13 | 16,89% | 12,08 |
| 5 | 10% | 1,43 | 159.795.665,75 | 18,97% | 10,48 |
| 6 | 20% | 1,56 | 264.596.106,98 | 22,86% | 8,57 |

Fonte: elaboração própria

Conforme esperado, a variação do preço de venda afeta significativamente a viabilidade do projeto e os resultados obtidos. Uma redução no preço do produto inviabilizaria o projeto, pois resultaria em um valor negativo de VPL, cenário no qual os custos associados ao projeto superam os benefícios financeiros trazidos pelos fluxos de caixa futuros, e, portanto, o projeto não apresenta viabilidade econômica em tais condições. Por outro lado, se o preço de venda praticado estivesse no patamar de US\$1,43/kg, o projeto passa a se tornar ainda mais atrativo, uma vez que o VPL quase triplica, enquanto o payback é reduzido em cerca de 4 anos. E pode-se dizer

que esse não é um cenário improvável, inclusive, no ano de 2023 o preço médio de importação do ácido cítrico foi de US\$1,46.

Em contrapartida, a volatilidade de preços em produtos químicos é uma característica intrínseca desse setor, influenciada por uma série de fatores econômicos, geopolíticos e de oferta e demanda. Como mencionado na seção 2.3.1, a China consolidou sua posição como um gigante na produção de ácido cítrico, destacando-se pela grande escala, eficiência produtiva e preços competitivos, com plantas com capacidade de produzir de 200.000 a 700.000 toneladas de ácido cítrico por ano (CCM, 2023). Essa presença dominante desafia as empresas produtoras em outros países, tornando difícil a implementação de estratégias de aumento de preços. A dinâmica do mercado, portanto, exige que as empresas estejam atentas e se adaptem rapidamente a essas variáveis para otimizar estratégias de precificação, gerenciar riscos e manter a competitividade no cenário global.

Ainda em relação ao preço de venda do produto final, uma análise interessante é observar que mediante uma variação de -5,25% no preço estabelecido para o ácido cítrico faria o projeto atingir o ponto no qual os fluxos de caixa descontados se igualam ao investimento inicial ($VPL = 0$ e $TIR = TMA$), indicando que nessa condição o retorno do investimento é exatamente suficiente para cobrir o custo de capital. Esse é o ponto em que o projeto atinge a neutralidade financeira, e a decisão de investir ou não no projeto é muitas vezes baseada no tempo necessário para atingir esse ponto e na taxa de retorno desejada pelos investidores. Contudo, é crucial notar que esse dado pode ser preocupante, uma vez que, de 2016 a 2021, o preço de importação do ácido cítrico permaneceu consistentemente abaixo desse patamar crítico, destacando a alta sensibilidade do projeto a essa variável.

Nesse contexto, alinhado ao conceito de bioeconomia circular apresentado na seção 2.1, é importante questionar se não faria mais sentido a implementação de uma biorrefinaria integrada, identificadas como peças-chave para aprimorar tanto a eficiência de recursos quanto o valor total da biomassa (STEGMANN, LONDO & JUNGINGER, 2020), com a capacidade de produzir diversos produtos, em comparação com uma unidade dedicada exclusivamente à produção de ácido cítrico. Essas biorrefinarias apresentam uma abordagem inovadora ao processar diversos tipos de resíduos, culminando na produção de uma ampla gama de produtos de alto valor agregado.

Essa configuração diversificada não só atende às demandas crescentes por sustentabilidade, mas também maximiza o aproveitamento dos recursos disponíveis e apresenta diversas vantagens do ponto de vista da viabilidade econômica. Uma biorrefinaria multifuncional oferece a vantagem da diversificação de receitas, reduzindo a dependência de uma única fonte de renda e proporcionando maior estabilidade financeira. Além disso, ao processar diferentes tipos de resíduos, a biorrefinaria otimiza o aproveitamento integral dos insumos, melhorando a eficiência

dos recursos e reduzindo custos associados à gestão de resíduos. A capacidade de produzir uma variedade de produtos também permite uma resposta mais flexível às mudanças nas condições de mercado, explorando nichos específicos e maximizando margens de lucro. Adicionalmente, a biorrefinaria pode se beneficiar de sinergias energéticas, aumentando a eficiência global e reduzindo custos operacionais. Em resumo, a diversificação da produção em uma biorrefinaria emerge como uma estratégia potencialmente viável do ponto de vista econômico, proporcionando resiliência financeira, otimização de recursos e adaptabilidade às dinâmicas do mercado (STEGMANN, LONDO & JUNGINGER, 2020).

Embora a configuração diversificada de uma biorrefinaria apresente notáveis benefícios sob a perspectiva de sustentabilidade e otimização de recursos, é válido ressaltar que para a adoção de uma biorrefinaria é sempre necessário considerar a complexidade e singularidade de cada contexto. A viabilidade desse modelo está intrinsecamente ligada aos investimentos necessários e aos retornos esperados, fatores que nem sempre são favoráveis, o que pode gerar desafios, especialmente no que se refere à estruturação da unidade.

Dessa forma, a decisão de optar por uma biorrefinaria multifuncional deve ser cuidadosamente avaliada, considerando não apenas os benefícios destacados, mas também a capacidade de viabilidade econômica de cada projeto específico. A análise individual de investimentos e retornos torna-se crucial para determinar a adequação desse modelo em um determinado contexto, reconhecendo que a abordagem pode não ser universalmente aplicável, sendo necessária uma avaliação criteriosa caso a caso.

4.7.3 Sensibilização do Investimento Fixo do projeto

A Tabela 22 exibe o comportamento dos indicadores de viabilidade econômica diante da sensibilização do Investimento Fixo do projeto.

Tabela 22 - Sensibilização do Investimento Fixo do projeto

| Cenário | Variação no investimento (%) | Investimento Fixo (R\$) | VPL (R\$) | TIR (%a.a) | Payback descontado (anos) |
|---------|------------------------------|-------------------------|----------------|------------|---------------------------|
| 1 | -20% | 278.270.232,39 | 115.862.744,18 | 18,34% | 10,91 |
| 2 | -10% | 313.054.011,44 | 85.428.984,35 | 16,37% | 12,61 |
| Base | - | 347.837.790,49 | 54.995.224,51 | 14,70% | 14,70 |
| 3 | 10% | 382.621.569,54 | 24.561.464,67 | 13,27% | 17,47 |
| 4 | 18% | 410.693.702,75 | 0,00 | 12,25% | 20,00 |
| 5 | 20% | 417.405.348,59 | -5.872.295,17 | 12,02% | - |

Fonte: elaboração própria

Percebe-se uma influência bastante significativa do investimento necessário para instalação da planta na análise de viabilidade. Isso aponta para a importância de realizar um estudo mais detalhado e específico para prever com precisão o montante do investimento, uma vez que essa estimativa foi a base para as demais e estando equivocada pode distorcer as análises de rentabilidade. O investimento máximo admissível para que o projeto tenha uma perspectiva de viabilidade positiva é de aproximadamente R\$411 milhões, o que representa um valor 18% maior que o investimento estimado pela metodologia descrita neste trabalho, que indicou um investimento necessário de quase R\$350 milhões. Contudo, é crucial ressaltar que, em fases iniciais de avaliação, é comum ocorrerem variações consideráveis nos valores estimados, podendo apresentar erros entre -30% e 30%. Essa margem de erro é inerente à incerteza associada à fase inicial de planejamento e, portanto, é essencial reconhecer a fragilidade dessa etapa, especialmente quando uma variação de 20% pode influenciar significativamente na viabilidade do projeto, evidenciando a importância de refinamentos posteriores na análise de investimento.

A empresa tem a capacidade de controlar o valor do investimento por meio de decisões estratégicas, como aquisição de materiais a preços mais vantajosos, seleção adequada da localização geográfica da planta. Além disso, a negociação de contratos, a otimização de processos, parcerias estratégicas, a adoção de tecnologias inovadoras e a capacitação da equipe são fatores adicionais que podem impactar positivamente o custo total do investimento.

Outra opção a ser considerada, sobretudo para a diminuição do payback, é o financiamento de parte do investimento. Ao reduzir o investimento inicial dos investidores por meio de capital de terceiros, dependendo do custo desse dinheiro, o financiamento pode contribuir para acelerar o início do projeto, resultando em retornos mais rápidos. Além disso, ao aumentar a capacidade de investimento disponível e criar alavancagem financeira, os projetos podem ser mais robustos e gerar retornos ampliados. A flexibilidade proporcionada pelo financiamento também permite ajustar o cronograma de pagamento, alinhando-o ao fluxo de caixa do projeto. É crucial considerar cuidadosamente as condições do financiamento, como taxas de juros e prazos, para garantir que sejam favoráveis e não comprometam a rentabilidade do projeto.

5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste estudo foi realizar uma análise de pré-viabilidade técnico-econômica para a produção de ácido cítrico a partir dos resíduos do processamento da laranja. A planta é concebida para atender à demanda interna, substituindo importações e promovendo a valorização dos resíduos da indústria citrícola. Localizada no estado de São Paulo, especificamente no município de Matão, visa aproveitar a oferta de resíduos das indústrias locais que estão concentradas nessa região.

Foram elaborados fluxos de caixa descontados para avaliar a viabilidade da planta projetada, considerando tanto o cenário base quanto análises de sensibilidade. No cenário base, com uma capacidade instalada de 33.000 toneladas por ano, o investimento total foi calculado em R\$382.621.569,54 e as receitas estimadas em R\$210.210.000,00 por ano. Em relação aos custos totais de produção, observa-se que 83,4% correspondem aos custos variáveis, destacando-se o custo de matéria-prima como o principal contribuinte, representando expressivos 71% desse montante, reforçando a relevância significativa da matéria-prima na estrutura de custos operacionais da unidade. Baseados nessas premissas, os cálculos revelaram um VPL positivo de R\$54.995.224,51, acompanhado de uma TIR de 14,70%, superior à TMA de 12,25%, e o Payback foi calculado em 14,70 anos.

Esses resultados apontam para uma viabilidade econômica, indicando que o projeto oferece benefícios financeiros ao longo de sua vida útil. No entanto, ressalta-se que a análise vai além dos indicadores financeiros, demandando considerações sobre sustentabilidade ambiental, impacto social e alinhamento com práticas de economia circular. O estudo destaca a importância de uma avaliação abrangente para garantir que a implementação do projeto esteja alinhada com objetivos mais amplos de sustentabilidade e responsabilidade social. Nesse contexto, destaca-se a relevância da análise de sensibilidade realizada, pois proporciona insumos valiosos para enriquecer e fundamentar essa discussão.

A análise de sensibilidade neste estudo concentrou-se em três principais parâmetros: o custo de obtenção dos resíduos, explorando possíveis reduções devido ao volume de aquisição; o preço de venda do ácido cítrico, sujeito a flutuações frequentes; e o investimento necessário para implementação do processo, o qual configura um dos itens estimados de maior relevância pois foi utilizado para estimar vários outros parâmetros do estudo.

Ao recalcular os indicadores de viabilidade após modificações em cada uma destas variáveis, concluiu-se que o projeto é de fato bastante sensível às variações nesses parâmetros. No que tange ao custo de obtenção dos resíduos, constatou-se um aumento expressivo na viabilidade com a diminuição desse custo. Reduzir em 50% o custo de aquisição praticamente duplicou o Valor Presente Líquido (VPL), destacando

a necessidade de parcerias estratégicas para mitigar esses custos. Quanto ao preço de venda do ácido cítrico, a análise apontou uma extrema sensibilidade a flutuações, gerando riscos significativos: enquanto um aumento no preço impulsionou a viabilidade, uma redução equivalente inviabilizaria o projeto, resultando em VPL negativo. Já para o investimento, o valor máximo admissível para manter uma perspectiva positiva de viabilidade foi identificado em cerca de R\$411 milhões, 18% superior à estimativa inicial, sublinhando a necessidade de precisão nessa avaliação para evitar distorções nas análises de rentabilidade.

Diante dos resultados encontrados e da discussão feita acima, pode-se afirmar que nas condições estabelecidas para a unidade estudada, o projeto apresenta fragilidades consideráveis, mesmo que apresente viabilidade econômica.

Essa conclusão decorre da não resolução efetiva da questão do resíduo gerado pelas processadoras de laranja, o qual configurava o ponto central a ser estudado, sendo um aspecto crucial para a sustentabilidade do empreendimento. Apesar de se obter um produto de maior valor agregado do que destiná-los para a nutrição animal, mais resíduos são gerados, e não há propostas de encaminhamento para esses, além do tratamento e descarte.

Além disso, a consideração do custo competitivo na China emerge como um fator potencialmente inibidor para as produções locais, dada a sensibilidade dessas operações em relação aos preços de mercado. Nessa perspectiva, o estudo realizado sobre o ácido cítrico se configura como um exemplo que pode servir de ponto de partida para análises de outros produtos. É uma lição aprendida, evidenciando a necessidade de considerar cuidadosamente os desafios e dinâmicas do mercado global ao planejar projetos industriais similares, e, sobretudo, buscando formas de tornar esses projetos mais interessantes, robustos e competitivos.

Nesse cenário, as biorrefinarias se destacam como uma opção promissora a ser explorada. No caso dos resíduos da laranja, o grande número de alternativas possíveis para o seu aproveitamento favorece essa abordagem, que envolve a criação de uma superestrutura de opções capaz de incorporar diversas combinações de tecnologias de processamento em um único espaço de decisão. Ao enfrentar problemas complexos como esse, que demandam a avaliação de diferentes cenários, produtos, matérias-primas e rotas de processamento, a questão central é determinar quais produtos oferecem as melhores vantagens do ponto de vista econômico e ambiental, como o D-limoneno e a pectina (SUZUKI, 2019).

Portanto, como limitações do estudo, pode-se mencionar a não consideração de outras oportunidades promissoras no contexto de uma biorrefinaria, conforme discutido anteriormente. Além disso, a falta de comparação com as plantas existentes no Brasil devido à escassez de dados disponíveis sobre essas instalações representa uma lacuna. A diversidade de fontes utilizadas para estimar os investimentos também

é uma limitação, uma vez que o modelo precisou ser adaptado, incluindo e retirando equipamentos da estimativa de referência. No contexto da análise de pré-viabilidade, é essencial reconhecer as limitações inerentes ao processo de estimativa do investimento, considerando que essa avaliação se fundamenta em diversas fontes da literatura e requer uma série de aproximações. Essa complexidade no processo de estimativa ressalta a importância de uma abordagem cautelosa e destaca a necessidade de futuras análises mais detalhadas para aprimorar a precisão dessas projeções de investimento. Vale ressaltar que o estudo não aprofundou a análise das formas de tratamento dos resíduos gerados no processo de produção do ácido cítrico, bem como estratégias para o reaproveitamento e potencial rentabilização desses resíduos, aspectos que mereceriam investigação mais detalhada em trabalhos futuros.

Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros, é recomendável a realização de estudos que explorem a viabilidade da biorrefinaria em diferentes contextos, considerando não apenas o ácido cítrico, mas também outros produtos, cuja diversidade de alternativas, muitas vezes não excludente, oferece a oportunidade de investigar a produção de diversos itens em uma mesma estrutura de processo, proporcionando uma abordagem mais integrada e sustentável. Além disso, estudos aprofundados sobre alternativas para a recuperação do produto final a fim de gerar menos resíduos ou ainda acerca do tratamento dos resíduos gerados ao longo do processo poderiam estruturar oportunidades para o aproveitamento integral desses subprodutos. Por fim, para uma análise mais robusta, seria interessante realizar um levantamento detalhado dos equipamentos necessários, considerando suas respectivas escalas, e obter cotações junto a fornecedores, contribuindo para uma estimativa mais precisa do investimento requerido. Essas abordagens poderiam enriquecer a compreensão e a viabilidade de projetos similares, promovendo soluções mais abrangentes e eficazes.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBI - Associação Brasileira de Bioinovação. **Identificação das Oportunidades e o Potencial do Impacto da Bioeconomia para a Descarbonização do Brasil**. 2022.

ABBI - Associação Brasileira de Bioinovação. **Estudo da ABBI mostra que Bioeconomia pode gerar US\$ 592,6 bi ao ano**. 2023. Disponível em <<https://abbi.org.br/noticias/estudo-da-abbi-mostra-que-bioeconomia-pode-gerar-us-5926-bi-ao-ano/>>

ABIQUIM. **ANUÁRIO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM, 2006

ABIQUIM. **ANUÁRIO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM, 2010

ABIQUIM. **ANUÁRIO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM, 2011

ABIQUIM. **ANUÁRIO DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM, 2018.

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: 10 dezembro 2023.

ÁGUAS DE MATÃO. **Legislação e Tarifas**. Disponível em: <<https://www.aguasdematão.com.br/legislacao-e-tarifas/>>. Acesso em: 16 dez. 2023.

ALVES, J. R. X. et al. **Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP)**. 2013. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/prod/2014nahead/aop_prod0637-12.pdf. Acesso em: 12 mai. 2021.

ANASTASSIADIS, S., MORGUNOV, I., KAMZOLOVA, S., & FINOGENOVA, T. (2008). **Citric Acid Production Patent Review**. Recent Patents on Biotechnology, 2(2), 107–123. doi:10.2174/187220808784619757

ANDRADE, Patrícia F.; BUSSULO, Jéssica R.; CARPI, João M. G.; PEREIRA, Isabella B. T.; YAMAMOTO, Kariyn. **CITRINO – Indústria de suco de laranja integral**. 2018. 149 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2018.

ARAVANTINOS-ZAFIRIS, G., TZIA, C., OREOPOULOU, V., & THOMOPOULOS, C. D. (1994). **Fermentation of orange processing wastes for citric acid production.** *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 65(1), 117–120. doi:10.1002/jsfa.2740650117

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações e boletins** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa SELIC** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>>. Acesso em: 8 dez. 2023.

BEHERA, B. C.; MISHRA, R.; MOHAPATRA, S. **Microbial citric acid: Production, properties, application, and future perspectives.** *Food frontiers*, v. 2, n. 1, p. 62–76, 2021.

BEROVIC, M.; LEGISA, M. **Citric acid production.** *Biotechnology annual review*, v. 13, p. 303–343, 2007.

BIANCONI, C. **Citrosuco e Citrovida formam gigante global de suco de laranja.** Disponível em: <<https://exame.com/negocios/citrosuco-citrovida-formam-gigante-global-suco-laranja-559846/>>. Acesso em: 16 dez. 2023.

BONATO, G. **Cargill investe US\$140 mi em ampliação de fábricas no Brasil.** 2015 Disponível em: <<https://exame.com/negocios/cargill-investe-us-140-mi-em-ampliacao-de-fabricas-no-brasil/>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BRASIL, E; LIMA, E; CRAVO, M. **Uso de gesso na agricultura. Aspectos gerais relacionados ao uso de fertilizantes e corretivos.** Capítulo 11, 133-145 p. 2018.

BRASIL. **Lei n. 13.123, de 20 de maio de 2015.** Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13123.htm Acesso em: 18 out. 2023.

DIÁRIO DO GRANDE ABC. **Cargill inaugura fábrica de ácido cítrico em Uberlândia. Notícias e informações do Grande ABC:** economia. 2023. Disponível em: <https://www.dgabc.com.br/Noticia/103209/cargill-inaugura-fabrica-de-acido-citrico-em-uberlandia>

CAVALCANTE, L. R. TD no 287, de 2020: **Encargos Trabalhistas no Brasil**, 2020.

CCM. **Citric projects of RZBC's subsidiaries going smoothly - China market news.** Disponível em: <<http://www.cnchemicals.com/Press/91639->

Citric%20projects%20of%20RZBCs%20subsidiaries%20going%20smoothly.html>. Acesso em: 8 nov. 2023.

CCM. **RZBC Boyuan proposes a 200,000 t per year citric acid project** - China market news. Disponível em: <<http://www.cnchemicals.com/Press/91730-RZBC%20Boyuan%20proposes%20a%20200,000%20t%20per%20year%20citric%20acid%20project%20.html>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

CCM. **Shandong Ensign: Citric acid capacity expansion proposal and refined citric acid project completion** - China market news. Disponível em: <<http://www.cnchemicals.com/Press/91863-Shandong%20Ensign:%20Citric%20acid%20capacity%20expansion%20proposal%20and%20refined%20citric%20acid%20project%20completion.html>>. Acesso em: 30 out. 2023.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Oportunidades e Desafios da Bioeconomia**. Relatório ODBio Integrado. Brasília, DF: 2021. 578 p.

CHAUVEL, Alain; FOURNIER, Gilles; RAIMBAULT, Claude. **Manual of Process Economic Evaluation**. Editions TECHNIP, 2003.

CHEMICAL ENGINEERING ONLINE. **Plant cost index archives**. Disponível em: <<https://www.chemengonline.com/site/plant-cost-index/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

CHEN, H., HE, X., GENG, H., & LIU, H. (2014). **Physiological characterization of ATP-citrate lyase in Aspergillus niger**. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 41(4), 721–731. doi:10.1007/s10295-014-1418-3

CIRIMINNA, R. et al. **Citric acid: emerging applications of key biotechnology industrial product**. Chemistry central journal, v. 11, n. 1, 2017.

ACS. **Citric acid**. Disponível em: <<https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/c/citric-acid.html>>. Acesso em: 20 set.. 2023.

CITRUSBR. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS EXPORTADORES DE SUCOS CITRICOS. **Economia: Mapeamento da cadeia**. Citrus BR. 2020. Disponível em: <http://www.citrusbr.com>. Acesso em: 25 out. 2023.

COMEXSTAT. **Exportação e Importação Geral**. Ministério da Economia. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/97081>. Acesso em 10 de outubro de 2023.

COMEXSTAT. **Exportação e Importação Geral**. Ministério da Economia. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/97082>. Acesso em 10 de outubro de 2023.

DA SILVA, LUANA VIEIRA. **Produção de ácido cítrico por *Yarrowia lipolytica* a partir de glicerol e análise proteômica** / Luana Vieira da Silva. – Rio de Janeiro, 2014. xviii, 126 p, 29,7 cm.

DAL'MAGRO, G. P.; TALAMINI, E. **Estimating the magnitude of the food loss and waste generated in Brazil**. Waste Management & Research. Porto Alegre, 2018.

DÁVILA, J. A., ROSENBERG, M., & CARDONA, C. A. (2015). **Techno-economic and Environmental Assessment of p-Cymene and Pectin Production from Orange Peel**. Waste and Biomass Valorization, 6(2), 253–261. doi:10.1007/s12649-014-9339-y

DHILLON GS, BRAR SK, VERMA M, TYAGI RD (2011). **Recent advances in citric acid bio-production and recovery**. Food Bioprocess Technol. 4(4):505–529

E4TECH; RE-CORD; WUR. **From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals : Final report for the European Commission Directorate-General Energy**. 2015.

EMATER. **Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola - ASPA**, Estado do Rio de Janeiro, 2019 - SISTEMA AGROGEO - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio de Janeiro - EMATER-RIO/CPLAN/NIDOC

EMBRAPA. **Bioeconomia: a ciência do futuro no presente**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-bioeconomia/sobre-o-tema>>. Acesso em: 14 out. 2023.

EMBRAPA. **Perdas e Desperdício de Alimentos – Perguntas e Respostas**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-perdas-e-desperdicio-de-alimentos/perguntas-e-respostas>. Acesso em 01 de nov. 2023.

FAESP. **Panorama da fruticultura no Estado de São Paulo**, 2022. Disponível em: <<https://faespsenar.com.br/panorama-da-fruticultura-no-estado-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 8 dez. 2023.

FAO. 2011. **Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention**. Rome

FERREIRA, J. et al. **Manual da Lei da Biodiversidade**. Instituto Escolhas. São Paulo, Março de 2021. Disponível em: <<https://institucional.ufrj.br/sisgen/files/2021/04/Manual-LeiDaBiodiversidade.pdf>>.

FERREIRA, Larisse Costa et al. **Determinação da massa específica de suco de laranja em função da temperatura através de modelos polinomiais**, 2019.

Jornada de Iniciação Científica e Extensão. Instituto Federal do Tocantins. Palmas, 2019.

FiB - Food Ingredients Brasil. **Aplicações do ácido cítrico na indústria de alimentos** Disponível em: <<https://revista-fi.com/artigos/todos/aplicacoes-do-acido-citrico-na-industria-de-alimentos>>. Acesso em: 27 set. 2023.

FORBES. **CitrusBR vê alta na produção de suco de laranja do Brasil em 2022/23.** Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2022/08/citrusbr-ve-alta-na-producao-de-suco-de-laranja-do-brasil-em-2022-23/>>. Acesso em: 16 dez. 2023.

FUNDECITRUS. **Inventário de árvores do cinturão citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro: retrato dos pomares em março de 2015** / Fundo de Defesa da Citricultura... [et al.]. – Araraquara, SP : Fundecitrus, 2015. 68 p.

GODOY, M. G. et al. **Agricultural residues as animal feed.** Em: **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering.** UFRJ. Elsevier, 2018. p. 235–256.

GUILLERMO, A., JIAN, Y. AND RYAN, H. (2010). **New biodegradable biocompatible citric acid nano polymers for cell culture growth & implantation engineered by Northwestern University Scientists.** Nano patents and innovations, US Patent Application 20090325859

HARRISON, R. G. et al. **Bioprocess Design and Economics. Bioseparations Science and Engineering.** Oxford University Press, 2015.

HLPE, 2014. **Food losses and waste in the context of sustainable food systems.** A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome 2014

HOFFELDER, J. **Pellets de Bagaço de cana-de-açúcar na matriz energética.** UFRGS, 2011.

HU, W.; LI, E. J.; YANG, H. Q. **Current Strategies and Future Prospects for Enhancing Microbial Production of Citric Acid.** Applied Microbiology and Biotechnology 2013, 103, 201–219.

IBGE. **Inflação.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

IBGE. **Produção Agropecuária.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/laranja/br>>. Acesso em: 29 set. 2023.

IFA, L. et al. **Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste**. Heliyon, v. 6, n. 9, p. e05009, 2020.

IMARCGROUP. **Citric acid market size, trends and forecast 2023-2028**. Disponível em: <<https://www.imarcgroup.com/citric-acid-manufacturing-plant>>. Acesso em: 24 set. 2023.

IPEA. **ODS 12 - Consumo e Produção Sustentáveis - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>>. Acesso em: 15 out. 2023.

KALAKI, R.B.; NEVES, M.F. **Plano estratégico para o sistema agroindustrial citrícola brasileiro**. Revista Gestão & Produção. São Carlos, janeiro de 2017.

KLITKOU, A.; FEVOLDEN, A. M.; CAPASSO, M. **From waste to value: Valorisation pathways for organic waste streams in circular bioeconomies**. London: Routledge, 2019.

KOTWAL, S.M. et al. **Production of α -galactosidase by thermophilic fungus *Humicola* sp. In solid-state fermentation its application in soyamilk hydrolysis**. Process Biochemistry. V. 33, p. 337-343, 1998.

Kuforiji, O., Kuboye, A. O., & Odunfa, S. A. (2010). **Orange and pineapple wastes as potential substrates for citric acid production**. International Journal of Plant Biology, 1(1), 4. doi:10.4081/pb.2010.e4

KUMAR, Amit; CAMERON, Jay; FLYNN, Peter. **Pipeline transport and simultaneous saccharification of corn stover**. Bioresource Technology, 2005.

KWAN, T. H. et al. **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, 2018.

LANGEVELD, H et al. **The biobased economy: Biofuels, materials and chemicals in the post-oil era**. Londres, England: Routledge, 2012.

LANGEVELD, J. W. A.; DIXON, J.; JAWORSKI, J. F. **Development perspectives of the biobased economy: A review**. Crop science, v. 50, n. S1, 2010

LAPUERTA, Magín et al. **Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions**. Fuel Processing Technology, 2008.

LHC Perquin, **Dissertation, Tech.** University Delft, Delft, The Netherlands, 1938.

LOPES, C. L.; CHIAVARI, J. **Bioeconomia na Amazônia Análise Conceitual, Regulatória e Institucional. Climate Policy Initiative & PUC-RJ.** Disponível em: <<https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/bioeconomia-na-amazonia-analise-conceitual-regulatoria-e-institucional/>>.

LOUIS DREYFUS. **Louis Dreyfus Company anuncia novo projeto de expansão em Matão (SP).** Disponível em: <<https://www ldc.com/br/pt/press-releases/louis-dreyfus-company-anuncia-novo-projeto-de-expansao-em-matao-sp/>>. Acesso em: 16 dez. 2023.

M. LEONEL; M.P. CEREDA. **Manipueira como substrato na biossíntese de ácido cítrico por *Aspergillus niger*.** Scientia agricola, v. 52, n. 2, p. 299–304, 1995. Departamento de Engenharia - FCA/ UNESP, Botucatu, SP

MA, E., CERVERA, Q., & MEJÍA SÁNCHEZ, G. M. (1993). **Integrated utilization of orange peel.** Bioresource Technology, 44(1), 61–63. doi:10.1016/0960-8524(93)90209-t

MARTÍN, M.A., SILES, J.A., CHICA, A.F., MARTÍN, A., 2010. **Biomethanization of orange peel waste.** Bioresour. Technol. 101, 8993–8999

MATTEY, M. (1992). **The Production of Organic Acids. Critical Reviews in Biotechnology,** 12(1-2), 87–132. doi:10.3109/07388559209069189

MAX, B. et al. **Biotechnological production of citric acid. Brazilian Journal of Microbiology,** v. 41, n. 4, p. 862–875, 2010.

MERCADO E CONSUMO. **Déficit do Brasil em produtos químicos soma US\$ 43,3 bi até novembro,** diz Abiquim. Disponível em: <<https://mercadoeconsumo.com.br/27/12/2023/economia/deficit-do-brasil-em-produtos-quimicos-soma-us-433-bi-ate-novembro-diz-abiquim/?cn-reloaded=1>>. Acesso em: 16 out. 2023.

MERCK. **Agar glicose-batata.** Disponível em: <https://www.merckmillipore.com/BR/pt/product/Potato-dextrose-agar,MDA_CHEM-110130#anchor_orderingcomp>. Acesso em: 21 dez. 2023.

MF RURAL. **GESSO AGRÍCOLA.** Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/busca/gesso-agricola>>. Acesso em: 28 dez. 2023

MF RURAL. **POLPA CITRICA.** Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/738457/polpa-citrica>>. Acesso em: 8 dez. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Citric Acid Market Insights**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/citric-acid-market>>. Acesso em: 24 set. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do Mercado de Acidulantes Alimentares do Brasil**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-food-acidulants-market-industry>>. Acesso em: 24 set. 2023.

NAEINI, A. T., ADELI, M., & VOSSOUGH, M. (2010). **Poly(citric acid)-block-poly(ethylene glycol) copolymers—new biocompatible hybrid materials for nanomedicine**. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 6(4), 556–562. doi:10.1016/j.nano.2009.11.008

NEGRO, V. et al. **Life cycle assessment of orange peel waste management. Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. June, p. 148–158, 2017.

NEVES, M. F. et al. **O retrato da citricultura brasileira**. Markestrat Centro de Pesquisa e Projetos em Marketing e Estratégia, 2010.

NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; KALAKI, R. B. **Mercado Brasileiro de Suco de Laranja: uma alternativa para mitigar os efeitos do declínio do consumo no mundo**. *Citrus Research & Technology*, v. 35, n. 2, 2014.

NIKULICHEVA, T. B. et al. **Recycling and disposal of gypsum-containing waste generated in the production of citric acid. IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 845, n. 1, p. 012152, 2021.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. **The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. Journal of cleaner production**, v. 314, n. 127973, p. 127973, 2021.

OCDE. **The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda**. 2009 Disponível em: <www.oecd.org/futures/bioeconomy/2030>

OEC. **Where does Brazil export Citric acid to?** (2021). Disponível em: <https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/bra/show/6291814/2021>. Acesso em: 17 nov. 2023.

PACHECO, T. F.; MENDES, T. D.; SALUM, T. F. C.; GONCALVES, S. B.; DAMASO, M. C. T. **Produção de ácido cítrico por fungos filamentosos a partir de glicerina bruta, coproduto do biodiesel**. Embrapa. Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel. Florianópolis, SC: Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação De Biodiesel, 2019.

PALMIERI, FERNANDA. **A competitividade das firmas de suco de laranja de pequeno porte no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2018.

PAPAGIANNI, M. **Advances in citric acid fermentation by *Aspergillus niger*: biochemical aspects, membrane transport and modeling**. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 244–263, 2007. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.01.002>

PASTORE, N. S.; HASAN, S. M.; ZEMPULSKI, D. A. **PRODUÇÃO DE ÁCIDO CÍTRICO POR ASPERGILLUS NIGER: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DE NITROGÊNIO E DE CONCENTRAÇÃO DE SACAROSE**. *Engvista*, v. 13, n. 3, 2011.

PATEL, Tushar; PANDYA, Hiral. **“CITRIC ACID PRODUCTION FERMENTATION PROCESS.”** *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education* 3 (2017): 3983-3991.

PAU LOKE SHOW, KEHINDE OPEYEMI OLADELE, QI YAN SIEW, FITRI ABDUL AZIZ ZAKRY, JOHN CHI-WEI LAN & TAU CHUAN LING (2015) **Overview of citric acid production from *Aspergillus niger***, *Frontiers in Life Science*, 8:3, 271-283, DOI: 10.1080/21553769.2015.1033653

PAULILLO, L.F. **Terceirização e Reestruturação Agroindustrial: Avaliando o Caso Citrícola Brasileiro**. *Revista de Administração Contemporânea*, vol. 3, nº. 1, p. 87-103, Jan/Abr 1999.

PAZOUKI, M., Panda, T. **Recovery of citric acid – a review**. *Bioprocess Engineering* 19, 435–439 (1998).

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

PFALTZGRAFF, L. A. **The study & development of an integrated & additive-free waste orange peel biorefinery**. n. September, p. 60–86, 2014.

POERWONO, H., HIGASHIYAMA, K., KUBO, H., POERNOMO, A. T., SUHARJONO, SUDIANA, I. K., BRITAIN, H. G. (2001). **Citric Acid. Analytical Profiles of Drug Substances and Excipients**, 1–76. doi:10.1016/s1075-6280(01)28002-1

PORTO, J.; SFORÇA, B. P.; BULLER, L. S. **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE SUCO DE LARANJA CONGELADO CONCENTRADO**. XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2021.

PRADO, Flávera Camargo. **Desenvolvimento de bioprocesso em escala semipiloto para produção de ácido cítrico por fermentação no estado sólido a partir do bagaço de mandioca.** 2002. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia.

QUÍMICA E DERIVADOS. **Ácido Cítrico: Aplicações Novas e Tradicionais Indicam Alta na Demanda.** Disponível em: <<https://www.quimica.com.br/acido-citrico-aplicacoes-novas-indicam-alta-na-demanda/>>. Acesso em: 16 out. 2023.

RABELLO, G. G.; DE OLIVEIRA, J. M. **Tributação sobre empresas no Brasil: comparação internacional.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2015.

REUTERS. **Cutrale deve faturar US\$ 1 bilhão este ano.** Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/noticias/cutrale-deve-faturar-us--1-bilhao-este-ano_46867.html>. Acesso em: 16 dez. 2023.

REZZADORI, K.; BENEDETTI, S.; AMANTE, E.R. **Proposals for the residues recovery: Orange waste as raw material for new products.** Food and Bioproducts Processing, Florianópolis, n. 90, p. 606, 2012.

RIVAS, B., TORRADO, A., TORRE, P., CONVERTI, A., & DOMÍNGUEZ, J. M. (2008). **Submerged Citric Acid Fermentation on Orange Peel Autohydrolysate.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(7), 2380–2387. doi:10.1021/jf073388r

RODRIGUES, C. **Desenvolvimento de bioprocesso para produção de ácido cítrico por fermentação no estado sólido utilizando polpa cítrica.** Programa de Pós-Graduação em Processos Biotecnológicos da Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2006.

ROHR, M., KUBICEK, C. P. AND KOMINEK, J. (1983) **Citric acid.** In: **Biotechnology**, Vol. 3, Reed, G. and Rehm, H. J. (Eds.), Verlag-Chemie, Weinheim, pp. 419-454

ROSSI, F.R.; TORKOMIAN, A.L.V. **O processo inovativo das indústrias processadoras de suco de laranja brasileiras e norte-americanas: uma comparação utilizando a análise de patentes.** Revista Gepros – Gestão da Produção, Operações e Sistemas, ano 10, nº3, julho-setembro de 2015.

S. SATHEESHKUMAR, P. SIVAGURUNATHAN, K. MUTHULAKSHMI, C. UMA, **Utilization of Fruit Waste for the Production of Citric Acid by using Aspergillus Niger,** Journal of Drug Delivery and Therapeutics. 2019; 9(4-A):9-14

SALAZAR, I. C.; ALZATE, C. C. **Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de la cáscara de naranja.** Ingeniería y Ciencia - ing.cienc., v. 7, n. 13, p. 65–86, 2011.

SANTOS, R.M.; NAAS, I.A.; MOLLO-NETO, M.; VENDRAMETTO, O. **An overview on the Brazilian orange juice production chain.** Revista Brasileira de Fruticultura, vol.35, nº1, março de 2013.

SEESP. **Piso salarial dos engenheiros para 2022.** Disponível em: <<https://www.seesp.org.br/site/index.php/comunicacao/noticias/item/20809-confira-o-piso-salarial-dos-engenheiros-para-2022>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

SILVA, A.F.; BARROS, G.S.C.; BOTEON, M. **Price analyses of the Brazilian citrus supply chain.** Journal of Food Science and Engineering, vol. 7, 2017.

SILVA, L. V. et al. **Produção de ácido cítrico.** Microbiologia Industrial: Alimentos. R.P. Nascimento, B.D. Ribeiro, K.S. Pereira, M.A.Z. Coelho(Org.). 1ed.: Elsevier Editora Ltda, 2018, v. 2, cap. 12, p. 429-464.

SILVA, M. F. de O.; PEREIRA, F. dos S.; MARTINS, J. V. B. **A bioeconomia brasileira em números.** 2018. BNDES Setorial 47, p. 277-332

SINGH DHILLON, G. et al. **Recent advances in citric acid bio-production and recovery.** Food and bioprocess technology, v. 4, n. 4, p. 505–529, 2011.

SOARES, A. G. **Desperdício de Alimentos no Brasil – um desafio político e social a ser vencido.** Embrapa, Rio de Janeiro, 2011

SOCOL, Carlos R. et al. New perspectives for citric acid production and application. Food Technology and Biotechnology, v. 44, n. 2, p. 141-149, mar. 2006. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/file/161868>.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. **The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters.** Resources, Conservation & Recycling: X, v. 6, n. 100029, p. 100029, 2020.

SUPERCITRUS. **Máquina de Suco de Laranja - Saiba como empresas estão reduzindo os gastos com a produção de suco de laranja e aumentando os Lucros.** SuperCitrus, 2 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.supercitrus.ind.br/2021/02/02/maquina-de-suco-de-laranja-saiba-como-empresas-estao-reduzindo-os-gastos-com-a-producao-de-suco-de-laranja-e-aumentando-os-lucros/>>. Acesso em: 18 nov. 2023

SUZUKI, Lorryne Lins. **Análise técnico-econômica e ambiental de processos de valorização do resíduo da indústria de suco de laranja**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

TETRA PAK. **Orange Book**. Disponível em: <<https://orangebook.tetrapak.com/chapter/fruit-processing>>. Acesso em: 22 out. 2023.

TORRADO, A. M. et al. **Citric acid production from orange peel wastes by solid-state fermentation**. Brazilian Journal of Microbiology, v. 42, n. 1, p. 394–409, 2011.

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

TRAN, C. T., SLY, L. I., & MITCHELL, D. A. (1998). **Selection of a strain of Aspergillus for the production of citric acid from pineapple waste in solid-state fermentation**. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 14, 399–404.

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B. **Analysis, synthesis and design of chemical processes**. Prentice Hall, 2012.

USDA. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. **PDS**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/>>. Acesso em: 16 dez. 2023

VANDENBERGHE, L. P. S. et al. **REVIEW Microbial Production of Citric Acid** Braz. Arch. Biol. Technol. 42 (1999) p. 263–276.

VOGELBUSCH Biocommodities. **Citric acid plants**. Disponível em: <<https://www.vogelbusch-biocommodities.com/technology/organic-acid-process-plants/citric-acid-technology/>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

VOGELBUSCH Biocommodities. **Showcase projects**. Disponível em: <<https://www.vogelbusch-biocommodities.com/references/>>. Acesso em: 30 out. 2023.

WANG, J. et al. **Techno-economic analysis and environmental impact assessment of citric acid production through different recovery methods**. Journal of cleaner production, v. 249, n. 119315, p. 119315, 2020.

WWF. **DRIVEN TO WASTE: THE GLOBAL IMPACT OF FOOD LOSS AND WASTE ON FARMS**., 2021. Disponível em: <<https://www.worldwildlife.org/publications/driven-to-waste-the-global-impact-of-food-loss-and-waste-on-farms>>.

ZHANG, H.J.; ZHANG, J.H.; XU, J.; TANG, L.; ZHONG-GUI MAO, Z.G. **A novel recycling process using the treated citric acid wastewater as ingredients water for citric acid production.** Biochemical Engineering Journal, v. 90, p. 206-213, 2014.